



***Pseudomonas* spp. y *Bacillus* spp. en la remoción e inmovilización *in vitro* de Cadmio, propuesta de un enfoque sustentable para la restauración de suelos**

**UNIVERSIDAD COLEGIO MAYOR DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD
PROGRAMA DE BACTERIOLOGÍA Y LABORATORIO CLÍNICO
TRABAJO DE GRADO MONOGRAFÍA**

BOGOTÁ, 2026



***Pseudomonas* spp. y *Bacillus* spp. en la remoción e inmovilización *in vitro* de Cadmio propuesta de un enfoque sustentable para la restauración de suelos**

LUISA FERNANDA PINEDA LACHE

ANGELLY CAROLINA SÁNCHEZ ZOCADAGÜI

**MONOGRAFÍA PARA OPTAR AL TÍTULO DE BACTERIÓLOGO Y
LABORATORISTA CLÍNICO**

**JOVANNA ACERO GODOY
ASESOR INTERNO**

**UNIVERSIDAD COLEGIO MAYOR DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD
PROGRAMA DE BACTERIOLOGÍA Y LABORATORIO CLÍNICO
TRABAJO DE GRADO MONOGRAFÍA**

BOGOTÁ, 2026



***Pseudomonas* spp. y *Bacillus* spp. en la remoción e inmovilización *in vitro* de Cadmio propuesta de un enfoque sustentable para la restauración de suelos**

APROBADA

JURADOS

ASESORES

**UNIVERSIDAD COLEGIO MAYOR DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD
PROGRAMA DE BACTERIOLOGÍA Y LABORATORIO CLÍNICO
TRABAJO DE GRADO MONOGRAFÍA**

BOGOTÁ, 2026

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo principalmente a mi familia, quienes me apoyaron desde el inicio y creyeron en mí, quienes se esforzaron a diario a pesar de los procesos para que yo pudiera llegar al final de este camino y me ofrecieran lo mejor de ellos en cada momento aun sin tener fuerzas.

A mis mejores amigos quienes me acompañaron y me animaron a no rendirme, que sembraron de su tiempo y sus recursos cuando más lo necesité.

A Luisa, mi compañera y amiga en los últimos años, quien vio en mí el potencial para crecer y dar lo mejor hasta el final.

Y a todos aquellos que han hecho parte de mi formación, de mi crecimiento personal y profesional.

Angelly Carolina Sánchez Zocadagui

Dedico principalmente este trabajo a mi familia, por ser mi mayor apoyo desde el día uno, a que no debo rendirme bajo ninguna circunstancia especialmente a mi ángel en el cielo mi abuelo que sin estar presente logró que sintiera su apoyo y compañía.

A mis amigos, que hicieron más llevadero mi proceso con sus alegrías y palabras de apoyo, especialmente a Carolina por nunca desfallecer y estar a mi lado en cada paso que di.

Y especialmente a mi pareja, Andrés por su apoyo incondicional, por motivarme constantemente, escucharme, creer en mí incluso cuando yo dudaba y acompañarme durante todo este proceso con amor y comprensión.

Luisa Fernanda Pineda Lache

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos principalmente a Dios, nuestra guía, paz y refugio, quien nos dio de su sabiduría y de su conocimiento para culminar esta etapa, por darnos el valor para seguir a pesar del cansancio y la duda, quien nos motivó a no desfallecer en los peores momentos que atravesamos en esta etapa.

Agradecemos a nosotras mismas por el apoyo incondicional que nos ofrecimos en este proceso, a no dudar una de la otra, a levantarnos de cada adversidad y sobre todo a la amistad que se formó a raíz de esta gran coincidencia.

A las personas que estuvieron en nuestro camino que nos ofrecieron una mano amiga, a nuestros docentes que jugaron un papel fundamental en este proceso, ya que nos dieron las bases que nos convierte el día de hoy en profesionales, por sus enseñanzas y sus vivencias que nos hacen soñar cada día con mejores oportunidades para nuestra vida.

A nuestra docente asesora Jovanna Acero, quien nos apoyó y acompañó desde el inicio, nos impulsó y nos motivó a permanecer y creyó en que podíamos lograrlo, sin ella este trabajo no hubiera sido posible completarlo.

A nuestras familias que sin su apoyo incondicional, sin sus palabras de aliento y de motivación no estaríamos aquí, por nunca dudar de nosotras y confiar en que seremos las mejores profesionales, esperamos debido a nuestra disciplina y desempeño ser un orgullo para cada uno de los miembros de nuestro núcleo familiar, amigos y conocidos.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	8
ABSTRACT.....	9
INTRODUCCIÓN.....	10
1. OBJETIVOS.....	13
1.1 Objetivo general.....	13
1.2 Objetivos específicos.....	13
2. ANTECEDENTES.....	14
3. MARCO TEÓRICO.....	19
3.1 Metales pesados en el ambiente.....	19
3.2 Características del cadmio.....	19
3.3 Cómo afecta al suelo agrícola la presencia de cadmio en la producción de alimentos.....	22
3.4 Biorremediación con microorganismos de suelos contaminados por cadmio....	24
3.5 Plantas y microorganismos que bioacumulan cadmio.....	24
3.6 Mecanismo en el cual las plantas bioacumulan los metales pesados.....	26
3.7 Sideróforos.....	27
3.8 Técnicas para la biorremediación de metales pesados.....	29
3.9 Microorganismos involucrados en la remoción del cadmio.....	31
3.10 Características generales de <i>Pseudomonas</i> spp.....	32
3.11 <i>Pseudomonas</i> spp. en el secuestro de metales.....	33
3.12 <i>Pseudomonas</i> spp. como biorremediador de cadmio.....	34
3.13 Características de <i>Bacillus</i> spp.....	36
3.14 <i>Bacillus</i> spp. en el secuestro de metales.....	37
3.15 <i>Bacillus</i> spp. como biorremediador de cadmio.....	38
4. DISEÑO METODOLÓGICO.....	39
4.1 Tipo de estudio.....	39
4.2 Recopilación de literatura.....	39
4.3 Criterios de inclusión.....	40
4.4 Criterios de exclusión.....	41
4.5 Universo, población, muestra.....	41
4.5.1 Universo.....	41

4.5.2 Población.....	41
4.5.3 Muestra.....	41
4.6 Hipótesis, variables, indicadores.....	41
4.6.1 Hipótesis.....	41
4.6.2 Variables.....	41
4.6.3 Indicadores.....	42
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43
6. CONCLUSIONES.....	48
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo del cadmio.....	21
Figura 2. Mecanismo de fitorremediación de cadmio por microorganismos.....	27
Figura 3. Expresión de proteínas transportadoras.....	34
Figura 4. Gen de <i>Pseudomonas aeruginosa</i> que le confiere resistencia al cadmio.....	36
Figura 5. Algoritmo utilizado en la selección de literatura científica.....	40
Figura 6. Principales temas de los estudios seleccionados para la monografía.....	43
Figura 7. Principales países de origen.....	44
Figura 8. Idiomas originales de publicación.....	45
Figura 9. Tipo de publicación.....	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades químicas y físicas del Cadmio.....	20
Tabla 2. Formas de liberación del cadmio a partir del suelo.....	22
Tabla 3. Cultivos sensibles a la acumulación y límite de cadmio en alimentos según la FAO.	23
Tabla 4. Plantas de interés económico y productivo.....	25
Tabla 5. Clasificación de los sideróforos según su estructura química.....	28
Tabla 6. Técnicas para la determinación de cadmio en el suelo.....	31
Tabla 7. Géneros microbianos biocumuladores de cadmio.....	32
Tabla 8. Taxonomía de <i>Pseudomonas</i> spp.....	33
Tabla 9. Taxonomía de <i>Bacillus</i> spp.....	36
Tabla 10. Eficiencia y especificidad por metal.....	38
Tabla 11. Variables implementadas en la revisión.....	42
Tabla 12. Eficiencia de remoción de cadmio por microorganismos.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS

Abrev.	Término
AIA	Ácido indol-3-acético
Al	Aluminio
Cd	Cadmio
Cd²⁺	Ion cadmio con carga positiva +2
CdCl₂	Cloruro de cadmio
Cu	Cobre
EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
mg/Kg	Miligramo por kilogramo
mM	Milimolar
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
TCLP	Toxicity Characteristic Leaching Procedure
Mo	Molibdeno
Zn	Zinc
MICP	Precipitación de carbonato inducida por microorganismos
g/cm³	Gramo por centímetro cúbico
°C	Centígrados
ATP	Adenosín Trifosfato
ADP	Adenosín difosfato
ICP-MS	Espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente
ICP-OES	Espectroscopia de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente
DTPA	Ácido dietilentriaminopentaacético
AAS	Espectrometría de Absorción Atómica



UNIVERSIDAD COLEGIO MAYOR DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD
PROGRAMA DE BACTERIOLOGÍA Y LABORATORIO CLÍNICO
TRABAJO DE GRADO MONOGRAFÍA

***Pseudomonas* spp. y *Bacillus* spp. en la remoción e inmovilización *in vitro* de Cadmio propuesta de un enfoque sustentable para la restauración de suelos**

RESUMEN

Los metales pesados que contaminan suelos agrícolas constituyen un gran problema ambiental de gran relevancia a nivel mundial, entre ellos el cadmio debido a la alta toxicidad que presenta, ya que puede acumularse en el suelo, ser absorbido por las plantas, almacenado y llegar a persistir en el ambiente. Ante esta situación se han desarrollado diversas técnicas como la biorremediación con microorganismos, considerada una alternativa sostenible frente a los métodos físico químicos tradicionales. En este contexto, esta monografía tuvo como objetivo analizar el potencial de *Pseudomonas* spp. y *Bacillus* spp. en la remoción *in vitro* de cadmio, como estrategia para la restauración de los suelos contaminados. Para ello, se realizó una revisión sistemática de literatura científica publicada entre 2018 y 2026, mediante bases de datos como Google Scholar, Science Direct y SpringerLink, en las que se seleccionaron estudios relacionados con la biorremediación de metales pesados mediante microorganismos, destacando los mecanismos de resistencia y remoción de cadmio. Los principales hallazgos evidencian que tanto *Pseudomonas* spp. y *Bacillus* spp. poseen múltiples mecanismos biológicos que les permiten tolerar cadmio, lo que lleva a demostrar su

potencial como agentes biorremediadores. Los resultados de esta revisión indican que los microorganismos estudiados representan alternativas prometedoras para el desarrollo de estrategias sostenibles de restauración de suelos contaminados; sin embargo, se requieren investigaciones adicionales que permitan validar su aplicación a mayor escala y su estabilidad en ecosistemas reales.

PALABRAS CLAVES: Biorremediación, contaminación del suelo, cadmio, metales pesados, *Pseudomonas* spp., *Bacillus* spp., *in vitro*.

ABSTRACT

Heavy metals contaminating agricultural soils represent a major environmental problem of significant global relevance. Among them, cadmium stands out due to its high toxicity, as it can accumulate in the soil, be absorbed by plants, stored within them, and persist in the environment over long periods of time. In response to this situation, various techniques have been developed, including bioremediation with microorganisms, which is considered a sustainable alternative to traditional physicochemical methods. Within this context, this monograph aimed to analyze the potential of *Pseudomonas* spp. and *Bacillus* spp. in the *in vitro* removal of cadmium as a strategy for the restoration of contaminated soils. To this end, a systematic review of scientific literature published between 2018 and 2026 was conducted using databases such as Google Scholar, Science Direct, and SpringerLink, from which studies related to the bioremediation of heavy metals by microorganisms were selected, with particular emphasis on the mechanisms of resistance and cadmium removal. The main findings demonstrate that both *Pseudomonas* spp. and *Bacillus* spp. possess multiple biological mechanisms that enable them to tolerate cadmium, thereby showcasing their potential as bioremediation agents. The results of this review indicate that the microorganisms studied represent promising alternatives for the development of sustainable strategies aimed at restoring contaminated soils; however, further research is needed to validate their application at a larger scale and to assess their stability within real ecosystems.

KEYWORDS: Bioremediation, soils contaminated, cadmium, heavy metals, *Pseudomonas* spp., *Bacillus* spp., *in vitro*.

INTRODUCCIÓN

El cadmio (Cd) es un metal pesado tóxico que se ha convertido en una preocupación ambiental en los últimos años, debido a su acumulación por la facilidad que posee para movilizarse en los suelos agrícolas y su gran impacto a la salud humana. Este metal puede llegar al suelo por diferentes formas, siendo la más relevante por el uso de fertilizantes fosfatados contaminados, estando presente en las rocas fosfóricas (apatita y fosforita, la materia prima de los fertilizantes), estas pequeñas rocas pueden contener impurezas metálicas como el cadmio, ya que este puede sustituir al calcio debido a su tamaño iónico similar y se relaciona con elementos traza de otros metales pesados (zinc, plomo, entre otros), por lo que su concentración en los fertilizantes depende del lugar de origen de las rocas fosfóricas (1).

Por lo anterior, el cadmio llega al suelo a través de varios mecanismos, liberándose al ambiente y dando inicio a su transporte y distribución en distintos compartimentos ambientales como el aire, agua y suelo. Una vez depositado en el suelo, el cadmio puede interactuar con diversos componentes pertenecientes al suelo, como minerales arcillosos, óxidos metálicos y materia orgánica, donde tiende a acumularse predominantemente en el horizonte A (2).

Esta capa del suelo es importante debido al desarrollo de las raíces de las plantas, porque actúa como retención inicial debido a la alta capacidad de intercambio catiónico y la presencia de compuestos orgánicos que pueden complejar el metal, sin embargo, bajo ciertas condiciones como la acidificación del suelo, el cadmio puede movilizarse hacia horizontes más profundos o ser absorbido fácilmente por las raíces de las plantas, debido a que el suelo tiene menos pH, aumentará la cantidad de cadmio disponible. Debido a su carácter no biodegradable y a su capacidad de bioacumulación, el cadmio puede permanecer en el suelo durante largos periodos de tiempo, generando efectos adversos sobre los ecosistemas, la productividad agrícola y la salud humana (3,4).

En Colombia, actualmente no existe todavía una normativa nacional sobre las concentraciones máximas de cadmio en suelos, sin embargo la Comisión del Codex Alimentarius del programa conjunto de la OMS/FAO, sugiere concentraciones máximas de Cd en suelo de 1,4 mg/Kg para plantaciones nuevas

sensibles como el cacao (5) y en la unión europea en el reglamento 2019/1009, se establece el límite en en productos derivados del cacao y en fertilizantes fósforo-cadmio para evitar acumulación en el suelo, donde la concentración de Cd que se recomienda tener en suelos debe ser menor a 60 mg/kg para evitar el exceso en cultivos (6).

Ante el incremento progresivo de la contaminación por cadmio y la ausencia de regulaciones específicas en algunos contextos, surge la necesidad de implementar estrategias efectivas que permitan reducir su impacto ambiental y su incorporación a la cadena trófica. En este sentido, se han desarrollado diferentes enfoques de remediación, entre los que se incluyen métodos físicos, químicos y biológicos, como la biorremediación que ha cobrado especial relevancia debido a su carácter sostenible, menor costo y la capacidad que tiene de adaptarse a las condiciones del entorno, involucrando el uso de plantas, microorganismos o consorcios microbianos (6).

Dentro de los microorganismos con potencial biorremediador, se encuentra un amplio grupo de bacterias capaces de tolerar, transformar o inmovilizar metales pesados presentes en el ambiente. Estas bacterias poseen diversos mecanismos fisiológicos y metabólicos que les permiten adaptarse a condiciones alteradas por estos contaminantes, como la biosorción en la pared celular, la bioacumulación intracelular, la producción de compuestos quelantes y la activación de sistemas de resistencia frente a metales tóxicos (7).

Entre los géneros bacterianos más estudiados en este campo se destacan *Pseudomonas* spp. y *Bacillus* spp. reconocidos por su capacidad de sobrevivir en ambientes contaminados y por su importante papel en procesos de restauración ambiental. *Pseudomonas* spp. es un grupo de microorganismos aerobios gram negativos, móviles y quimioheterótrofos. Este género ha cobrado una gran relevancia debido a que contribuyen al crecimiento vegetal, la resistencia sistémica inducida y el control de fitopatógenos en las plantas, a través de diferentes mecanismos de acción entre los que destacan la producción de diversos compuestos antimicrobianos, como el 2,4-diacetilfloroglucinol y enzimas celulolíticas, entre otros metabolitos que producen fitohormonas.

Pseudomonas spp. están presentes en los suelos de forma abundante especialmente en la rizosfera, tienen una alta tasa de reproducción en comparación con otras bacterias (4). La remoción de metales la pueden realizar mediante biosorción y bioacumulación, en donde las bacterias absorben el cadmio que está en el medio a través de grupos funcionales y lo depositan en su pared celular, que es capaz de resistir el daño que éste ocasione debido a la modificación que ocurre en el complejo pared celular - membrana plasmática (8).

Por su parte *Bacillus* spp., hace referencia a un grupo de bacterias Gram positivas, reconocidas por su capacidad para formar esporas resistentes, lo que los hace persistentes en el medio ambiente bajo condiciones adversas como la temperatura, el pH y la desecación, esto permite que los bioinoculantes tengan una larga vida útil y puedan soportar ambientes contaminados con cadmio sin perder ninguna función. Muchas de estas cepas toleran altas concentraciones de cadmio y otros metales pesados gracias a mecanismos de resistencia como bombas de eflujo, producción de proteínas quelantes y sistemas antioxidantes. La pared celular, rica en peptidoglicano, ácidos teicoicos y grupos funcionales, facilitan la unión iónica del cadmio (9).

Estos dos microorganismos que trabajan en conjunto permiten evaluar estrategias microbianas con alto rendimiento de reducir la biodisponibilidad del cadmio en el suelo y al mismo tiempo logran mejorar la salud y la productividad de los cultivos, a través de la capacidad que poseen para tolerar condiciones contaminantes por metales en los suelos. No obstante, el potencial efectivo para la inmovilización o remoción de este metal por medio de microorganismos bajo condiciones *in vitro*, se encuentra en constante estudio, análisis de resultados y actualización de metodologías y técnicas, por lo que se destaca la importancia de profundizar en este tema y es la principal justificación de esta investigación.

¿Cuál es la capacidad de *Pseudomonas* spp. y *Bacillus* spp. para remover o inmovilizar cadmio en suelos contaminados en condiciones *in vitro* y por qué son microorganismos considerados elegibles para la restauración de suelos?

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo general

Evaluar la capacidad de las cepas de *Pseudomonas* spp. y *Bacillus* spp. en la remoción y biorremediación *in vitro* de cadmio en suelos contaminados, por medio de un enfoque sustentable orientado a la recuperación de la calidad del suelo, por medio de una revisión sistemática.

1.2 Objetivos específicos

- Registrar y analizar información actual y relevante sobre la viabilidad del uso de *Pseudomonas* spp. y *Bacillus* spp. en el proceso de biorremediación *in vitro* de suelos, mediante la búsqueda en bases de datos.
- Identificar estudios de caso donde se ha implementado *Pseudomonas* spp. y *Bacillus* spp. para la presumible biorremediación de suelos contaminados con cadmio, resaltando los resultados obtenidos.
- Comparar los resultados de diferentes estudios sobre la capacidad de *Pseudomonas* spp. y *Bacillus* spp., como potencial restaurador de suelos contaminados por metales pesados.

2. ANTECEDENTES

Diferentes autores han abordado la problemática de la contaminación por cadmio y el potencial de los microorganismos en el proceso de biorremediación, donde se evidencian avances significativos que permiten comprender los mecanismos de resistencia, tolerancia y remoción de este metal pesado en distintos contextos ambientales; varios estudios se han enfocado en bacterias con alta capacidad adaptativa, como *Pseudomonas* spp. y *Bacillus* spp. Asimismo se han desarrollado investigaciones tanto en condiciones *in vitro* como *in vivo*, evaluando la eficiencia de remoción, el impacto en la absorción de cadmio por parte de las plantas y en la calidad de los suelos agrícolas. A continuación, se presentan algunos de los principales antecedentes que sustentan el desarrollo de esta investigación.

Chellaiah en el año 2018 determinó que *Pseudomonas aeruginosa* es una de las bacterias más versátiles y resistentes al cadmio, encontrándose comúnmente en sitios contaminados ya que actúa como biosorbente eficaz, eliminando metales pesados de soluciones acuosas, residuos contaminados, suelos y aguas, *Pseudomonas aeruginosa* aislada de lodo activado y sometida a mutación con agentes específicos, elimina hasta el 94,7% en una solución de 30 mg/L de Cd^{2+} en 60 minutos, cuantificado mediante espectrometría de absorción atómica mediante la absorción de luz UV de pequeñas trazas del metal en estudio; en otro estudio la cepa E1 de *Pseudomonas* demostró tener una gran resistencia al cadmio en altas concentraciones de 18mM, de igual manera juega un papel clave en la fitoextracción de metales, ayudando a las plantas a absorber metales del suelo (10).

Živković y colaboradores, realizaron estudios en la cepa de *Pseudomonas aeruginosa* san ai en el año 2018, cuyo potencial se ha incrementado para la biorremediación de cadmio por tener alta resistencia con resultados de la concentración mínima inhibitoria de 7,2 mM y propiedades de biosorción, al exponer a una concentración inicial de 0,9mM se obtuvo una acumulación del 75% de cadmio en la biomasa del microorganismo, eliminando 0,307mM de cadmio por gr de biomasa luego de 48 horas determinado mediante ICP-OES (utiliza un plasma de argón a altas temperaturas para excitar átomos, emitiendo luz

característica medida por un espectrómetro); el otro 25% se une a los polisacáridos extracelulares excretados al medio. *Pseudomonas aeruginosa* san ai presenta dos tipos de mecanismos ante la exposición de cadmio, respuesta al estrés y respuesta de defensa, lo que la convierte en una cepa ecológicamente relevante (11).

Al-Dhabi y colaboradores en el año 2019, demuestran que a través de la pared celular de las bacterias, se hace la absorción de metales pesados como el mercurio, el cadmio, el plomo y el cobre, por una interacción con los polisacáridos extracelulares, que bioacumulan los metales al ser atraídos a la superficie del microorganismo por los diferentes grupos funcionales que poseen, carboxilo, hidroxilo, amino, entre otros. Incluso el pH influye en el nivel de captación de los metales; en el estudio un pH de 6,0-9,0 logró la mayor absorción de cadmio evaluado mediante ensayos de biosorción y análisis espectrofotométrico, al darse la unión de grupos funcionales cargados negativamente con iones metálicos cargados positivamente, a pH más altos, alcanzado un porcentaje de remoción del 80% en las cepas analizadas, lo que equivaldría a una concentración mínima inhibitoria de 300 µg/mL, donde una de las cepas demostró mayor capacidad de resistencia a Cd (12).

En el 2021, Mathivanan y colaboradores demostraron diversas estrategias adaptativas que emplean las bacterias para enfrentar la toxicidad de metales pesados en ambientes contaminados, destacando el papel fundamental de los sideróforos como mecanismo de resistencia y detoxificación; en particular evidenciaron que la pioverdina producida por *P. fluorescens* y *P. aeruginosa* corresponde a un sideróforo que utiliza la bacteria para eliminar iones metálicos Cd, Al, Cu, Mo y Zn facilitando su transformación y reduciendo su toxicidad en el entorno, de igual manera la rizobactina B producida por *Pseudomonas fluorescens* asimila y remedia la toxicidad de metales pesados como el uranio mediante procesos de complejación y transporte (13).

En el año 2021, Bravo y colaboradores realizaron el primer estudio de cadmio en suelo agrícola de cultivos de cacao colombianos, evidenciando zonas contaminadas en departamentos como Antioquia, Santander, Boyacá, Huila, Meta, con variación entre 0,01 mg kg⁻¹ a 27 mg kg⁻¹ de cadmio en algunas fincas de las regiones encuestadas, superando la normatividad establecida por el ministerio

agrícola de Finlandia (1 mg kg^{-1}), aplicado a nivel internacional por el PNUMA (ya que Colombia aún no cuenta con normatividad de calidad del suelo), demostrando que el cadmio si está presente en suelo por la composición de estos, al desarrollarse de rocas sedimentarias, depósitos de arena y actividad volcánica (14).

Arce y colaboradores, en el año 2022 analizaron el potencial de varias cepas microbianas que tienen la capacidad para reducir los niveles de contaminación por cadmio, para lo cual plantearon estrategias basadas en microorganismos tolerantes a grandes concentraciones de metales pesados, las cuales han emergido como alternativas viables, económicas y de bajo impacto ambiental para reducir la entrada y biodisponibilidad de cadmio a la cadena trófica. Además, en otros estudios se demostró que *B. megaterium* fue capaz de remover el 24,68% de Cd en una solución líquida a una concentración inicial de 1951 mg/kg y final de 1469 mg/kg, aumentado la tasa de remoción con la adición de enmiendas como el biocarbón, más que con la aplicación de sistemas individuales, *B. megaterium* incrementa la capacidad de acumulación intracelular al disminuir el pH por la producción de ácidos orgánicos e inorgánicos en una vía metabólica secundaria (15,16).

Bravo y Braissant determinaron en el año 2022 que aunque *Pseudomonas* spp, muestra alta capacidad de biosorción y bioprecipitación, advierten que no se han usado en suelos agrícolas a gran escala debido al alto riesgo sanitario como lo es *P. aeruginosa*, al ser patógena, esta ha presentado altas tasas de remoción de cadmio en medios de cultivo, pero su eficiencia disminuye considerablemente en suelos reales, especialmente si hay altas concentraciones de metales pesados o por la competencia con microbiota nativa (17).

Yu y colaboradores en el año 2023 realizaron un estudio donde evaluaron el potencial de *Bacillus vietnamensis* 151-6 para absorber o remover cadmio del medio, inoculando la cepa en plantas de arroz en ensayos de maceta y de campo observando la reducción del cadmio en diferentes tejidos de la planta, comprobaron que en condiciones de cultivo mostró una elevada capacidad de remoción del cadmio de un 91% en condiciones controladas a una concentración inicial de 0,1 mM CdCl_2 . En ensayos *in vitro*, la cepa mostró una remoción intracelular

aproximada del 54% en 72 horas, cuantificado mediante ICP-MS en los tejidos vegetales lo que evidencia su capacidad para absorber y reducir la biodisponibilidad del metal (18).

En el año 2024, Tomar y colaboradores analizaron el uso de bacterias modificadas genéticamente como estrategia para mejorar la eficiencia de la biorremediación de contaminantes, destacando a *Pseudomonas* spp. y *Bacillus* spp. por su capacidad de adaptación y transformación de compuestos tóxicos mediante mecanismos como bioacumulación, reacción de oxidación-reducción, quelación y remoción biológica. En particular, evaluaron el comportamiento de dos cepas de *Pseudomonas putida*, comparando su desempeño frente a versiones modificadas genéticamente. Los ensayos se llevaron a cabo en sistemas acuosos contaminados, bajo condiciones experimentales estandarizadas de pH, temperatura y tiempo de exposición, lo que permitió analizar la cinética de remoción en periodos cortos. Los resultados evidenciaron que la cepa modificada presentó una mayor eficiencia en la eliminación de contaminantes, alcanzando una tasa de remoción cercana al 75% después de 24 horas de incubación, evaluada mediante análisis ICP-MS en comparación con la cepa no modificada (19–21).

Chen y colaboradores en 2024, evaluaron la capacidad de la cepa *Pseudomonas nitroreducens* para absorber cadmio en soluciones acuosas y suelos contaminados; en el estudio con la planta *Houttuynia cordata*, gracias a la presencia de *Pseudomonas nitroreducens* se redujo significativamente la absorción de cadmio demostrando que su presencia en el suelo disminuyó la cantidad de bioacumulación de las plantas hacia el cadmio, observaron que en las hojas hubo una disminución entre 3,087 y 11,421 mg/Kg, en raíces hubo una disminución entre 9,062 y 21,404 mg/Kg con respecto al grupo control, esta reducción fue significativa para concentraciones de cadmio mayores de 50 mg/Kg en el suelo, sugiriendo su gran capacidad para inmovilizar el metal en el suelo y disminuir su biodisponibilidad para las plantas (22).

Zhang y colaboradores en el año 2025 desarrollaron un estudio del análisis metagenómico donde revelaba el mecanismo de biorremediación de contaminación por plomo y cadmio, este experimento se llevó a cabo en condiciones controladas de laboratorio y microparcels, lo que limita su aplicación inmediata a condiciones

reales, donde se puede ver afectado por el clima, el drenaje y la biodiversidad que pueden alterar significativamente los resultados que se esperaban a una concentración inicial de 50 mg/L Cd²⁺; aunque la remoción fue del 71,26% de cadmio extraíble con una concentración final de 9,94 mg/kg, el 28,74% restante puede continuar siendo bioaccesible para las plantas, la eficiencia de *Bacillus cereus* depende significativamente del pH del suelo, la temperatura y la humedad y estos parámetros no son fáciles de controlar en suelos agrícolas afectados por la minería (23).

En el año 2025 Rajasekar y colaboradores, evaluaron la capacidad de diferentes bacterias para eliminar las altas concentraciones de metales pesados como zinc, cadmio y níquel mediante el proceso de precipitación de carbonato inducida por microorganismos (MICP), es una estrategia que permite inmovilizar los metales en formas menos biodisponibles. El estudio se desarrolló en condiciones controladas de laboratorio, donde se trabajó con soluciones contaminadas con concentraciones iniciales de 0 a 6 mM de estos metales, permitiendo analizar la eficiencia del proceso en periodos de tiempo definidos. Los resultados evidenciaron que las tres cepas bacterianas evaluadas lograron eliminar hasta un 93% de los metales pesados en 72 horas, determinado mediante análisis ICP-OES, destacándose especialmente el género *Comamonas* spp., que alcanzó una eficiencia de remoción del 95%, superando a las otras cepas analizadas. Este alto porcentaje de remoción se le atribuyó a la capacidad de los microorganismos para inducir la formación de carbonatos, facilitando la precipitación y la estabilización de los metales en el medio (24).

En 2025 Kulkarni y colaboradores realizaron un estudio con *Bacillus subtilis*, exploraron una estrategia sostenible para la biorremediación de sedimentos y utilizarlos como posible material de construcción, emplearon hidróxido de calcio como un agente aglutinante junto a la bacteria, evaluando la reducción de lixiviación de metales pesados (Cd, Ni, Zn) usando el método Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) de la US EPA (determinar la concentración de contaminantes que se liberan cuando un material entra en contacto con un medio acuoso que simula condiciones de un relleno sanitario (vertedero). Si la concentración excede los límites regulatorios de la EPA, el material se clasifica como residuo peligroso) por medio de este proceso lograron comprobar una

reducción de lixiviación elevada como en el caso del cadmio de 50 mg/kg a 1,1 mg/kg, fue de 97,3%, del Níquel de un 92% y del zinc un 98%, este experimento se basó en lo eco-sostenible y eficaz, de igual manera los sedimentos tratados se consideran seguros para el uso posterior en ingeniería y construcción (25).

Liang y colaboradores en el 2025, realizaron un estudio para identificar bacterias resistentes a Cd, donde aislaron dos cepas de suelo contaminado por Cd denominadas C9 y C27, ambas identificadas por secuenciación y análisis morfológico como *Bacillus cereus*, a una concentración inicial de 100–500 mg/L de Cd²⁺, al alcanzar tasas de eliminación de hasta 26,75% y 32,27% a una concentración máxima de Cd de 70µM, a las 36h y 48h, respectivamente, aumentando cada vez que se aumentaba las concentraciones de Cd. Asimismo, plantearon que estas cepas producían niveles más altos de sideróforos y AIA, por lo que esto contribuye a la resistencia al Cd, además observaron que esas bacterias mantienen su viabilidad y actividad metabólica en condiciones de estrés por metales pesados, lo que resalta su potencial aplicación en procesos de biorremediación de suelos contaminados (26).

En el año 2025, Fernández y colaboradores identificaron el potencial de cepas de *Bacillus* spp. como prometedores biorremediadores de Cd en cultivos de cacao, al ser escalable y una solución natural que mitigaría los niveles de este metal. Estas cepas demostraron la adaptabilidad a condiciones de temperatura y pH, lo que los hace ideales para la eliminación de Cd, ya que 2 de los 69 aislados presentaron una tolerancia a Cd lo que les permite crecer a altas concentraciones del metal, superando los 200 mg/L⁻¹, un valor mayor a lo característico de Cd encontrado en productos latinoamericanos de cacao, superando el umbral de exportación aceptado por la Unión Europea de 0,60 mg/kg⁻¹ (27).

Olivo y colaboradores en el año 2026 evaluaron el uso de diferentes consorcios microbianos nativos como estrategia para la remediación de suelos cacaoteros contaminados con cadmio, esta investigación se centró en aislar y seleccionar comunidades microbianas autóctonas con capacidad de tolerar la biodisponibilidad de cadmio en suelos agrícolas, los resultados arrojaron que los consorcios microbianos presentaron una capacidad significativa para inmovilizar y transformar el cadmio presente en el suelo, disminuyendo su disponibilidad para

las plantas de cacao, los mecanismos que hallaron fue bioabsorción, biocumulación, precipitación y cambios en las condiciones físico químicas de suelos inducidos por la actividad microbiana, de igual manera identificaron que el uso de microorganismos nativos favorece a la adaptación al ecosistema local y mejora la estabilidad del proceso de biorremediación (28).

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Metales pesados en el ambiente

En el ambiente existen sustancias de importancia que pueden ser esenciales para cumplir ciertos procesos para la vida o interferir de forma negativa, como los metales pesados que son elementos de alta masa atómica de los cuales los más potenciales tóxicos, aunque algunos en bajas dosificaciones suelen ser oligoelementos esenciales, como el arsénico, cadmio, plomo, mercurio, níquel y cromo; estos elementos se pueden obtener por diferentes maneras, como la meteorización de rocas, erupciones volcánicas, agricultura, minería, industria textil, aguas residuales, lodos de depuradora, quema de carbón, uso de baterías y productos electrónicos (29).

La presencia de estos metales pesados puede causar contaminación en grandes áreas o zonas delimitadas, produciendo la reducción de fertilidad del suelo, las alteraciones en redes tróficas, contaminación de aguas residuales o subterráneas y por último causa la red de bioacumulación en plantas que luego pasará a los animales hasta llegar al ser humano. Para que estos metales sean contaminantes deben ser transportados, por corrientes de aire, de forma gaseosa, por las corrientes de agua y por los suelos, ambientes costeros, o deslave de rocas ricas en estos. Entre estos metales pesados contaminantes para el ambiente, encontramos el cadmio que tiene muchos efectos nocivos para la salud humana incluyendo daño renal, cáncer de pulmón, cáncer de riñón y la enfermedad de Itai-itai, además, este será el metal pesado del cual realizaremos una revisión en esta monografía (28).

3.2 Características del cadmio

El cadmio es un metal pesado no esencial presente en bajas concentraciones en la corteza terrestre, no existe en depósitos minerales puros sino como una impureza en minerales de zinc, plomo y cobre, siendo liberado principalmente por actividades mineras, metalurgia, combustión de combustibles fósiles, aplicación de fertilizantes fosfatados y aguas residuales industriales, además al ser un metal pesado presenta diferentes propiedades químicas y físicas

(tabla 1).

Tabla 1. Propiedades químicas y físicas del Cadmio

Propiedad	Valor
Número atómico	48
Masa atómica	112.41 u
Estado de oxidación	+2
Serie química	Metales de transición
Punto de fusión	321.1 °C
Punto de ebullición	767 °C
Densidad	8.65 g/cm ³ (a 20 °C)
Estado físico	Sólido metálico
Color	Plateado, azulado
Conductividad eléctrica	Alta
Bioacumulación	En organismos vivos y suelos
Estabilidad	Estable en aire seco, pero se oxida lentamente en ambientes húmedos

Adaptado de **PubChem** (U.S. National Library of Medicine) (30)

El cadmio es un metal pesado altamente tóxico que produce altos riesgos para la salud humana y el medio ambiente, la forma más común de encontrar este metal en el suelo es Cd^{2+} en su forma más soluble y que es más fácil de absorber por las plantas, este metal es altamente móvil en suelos especialmente en condiciones de pH ácido y baja materia orgánica, lo que le facilita su absorción por las raíces de las plantas y la acumulación en los tejidos comestibles; en condiciones bajas incluso el cadmio puede interferir con procesos fisiológicos de las plantas, como la fotosíntesis y la absorción de nutrientes (31,32).

El transporte atmosférico de este metal, es parte importante de su distribución en los demás lugares del medio ambiente, al ser liberado de las actividades antropogénicas (emisiones industriales, incineración de desechos,

quema de combustibles fósiles) o naturales (actividad volcánica e incendios forestales), en pequeñas cantidades, el cadmio se dispersa con facilidad influenciado por factores como la velocidad del viento, el tamaño de las partículas y las características de las superficies del ambiente, pero antes de ser depositadas, sufre varios cambios en el movimiento de masas de aire cargadas del mismo, recorriendo largas distancias en el mismo territorio o llegar a alcanzar distancias continentales (Fig. 1) (2,33).

Una vez en el suelo, el cadmio puede existir en diferentes formas químicas, influenciadas por factores como el pH, la materia orgánica y la textura del suelo, el cadmio puede adsorberse a partículas del suelo, especialmente en suelos con alto contenido de arcilla y materia orgánica, de igual manera se puede movilizar en suelos ácidos aumentando la biodisponibilidad para las plantas y por último puede acumularse en la biota del suelo y transmitirse a través de la cadena trófica (34).



Figura 1. Ciclo del cadmio. El Cd luego de ser liberado puede viajar a largas distancias y depositarse en el ambiente para después reiniciar su ciclo. Adaptada de (2)

En el suelo el cadmio se presenta como Cd^{2+} unido a minerales arcillosos haciendo un intercambio catiónico, a materia orgánica formando complejos orgánicos y a óxidos de hierro por absorción; su movilidad y biodisponibilidad depende de factores como el pH, contenido de materia orgánica, textura y

condiciones redox. El cadmio tiene diferentes dinámicas en el suelo su principal entrada al suelo es por la industria agrícola en fertilizantes fosfatados, estiércol de zonas con alta contaminación, lodos de depuradora o de forma natural como la meteorización de rocas con sulfuros; luego tiene diversas transformaciones químicas, dando lugar a la unión a compuestos orgánicos o inorgánicos cambiando su movilidad, pasa a formas insolubles o solubles según las condiciones abietales. El cadmio puede salir del suelo de diferentes maneras como se muestra en la tabla 2 (35).

Tabla 2. Formas de liberación del cadmio a partir del suelo.

Forma de salida	Definición
Lixiviación	Se filtra a aguas subterráneas en suelos permeables o ácidos
Escorrentía	Arrastre de cadmio particulado y disuelto hacia ríos y lagos
Absorción vegetal	Captado por raíces y traslocado a tallos, hojas y frutos
Dispersión atmosférica	El polvo del suelo contaminado puede ser levantado por el viento y llevar cadmio en su composición lo que lo hace llegar a la atmósfera.

Adaptación y recopilación de información (36)

A diferencia de otros elementos como el nitrógeno o el carbono, el cadmio no tiene una función biológica esencial y no existe como tal un ciclo biológico activo, su presencia y movimiento dependen en gran medida de actividades humanas y procesos geoquímicos pasivos (37).

El cadmio no se degrada, solo cambia de forma química o se transfiere de un compartimento a otro, en suelos agrícolas puede estar presente durante siglos especialmente a fracciones ligadas a minerales, en sedimentos profundos inmovilizado por enterramiento pero puede liberarse por cambios redox, este al ser similar al zinc en tamaño iónico y química usa las mismas rutas de absorción en organismos, pero lo que no se sabe es que así sea en bajas concentraciones es tóxico para el ser humano; estudiar el cadmio es esencial debido a su alta toxicidad

a concentraciones muy bajas, debido a que no es esencial para la vida y tiene una alta tasa de bioacumulación y biomagnificación en cadenas tróficas (8).

3.3 Cómo afecta al suelo agrícola la presencia de cadmio en la producción de alimentos

La presencia de cadmio en los suelos agrícolas puede generar muchos efectos negativos para la producción de alimentos, sobre todo desde el punto agrícola, ambiental y en salud pública; la presencia de cadmio en el suelo puede causar que la actividad microbiana se reduzca junto con la materia orgánica que se encuentra presente en el suelo, alterando el equilibrio de nutrientes y minimizando la capacidad de filtración en el suelo, cambia el pH del suelo favoreciendo la acidez, aumentando su movilidad y toxicidad; el cadmio al ser adsorbido por las raíces y acumulado por los tejidos vegetales provoca clorosis, atrofia radicular y una gran reducción del crecimiento de la planta interfiriendo con la absorción de nutrientes esenciales como hierro, zinc, magnesio, potasio y fósforo (29,38).

Las concentraciones de cadmio dependen mucho de la región y las prácticas agrícolas que se desarrollen en el lugar, en suelos no contaminados los niveles de cadmio suelen oscilar entre 0,1 y 1,0 mg/kg, sin embargo en áreas con uso intensivo de fertilizantes fosfatados o cercanas a fuentes industriales, las concentraciones pueden ser significativamente más altas, un estudio internacional estimó que entre el 14% y el 17% de las tierras cultivables del planeta presentan concentraciones tóxicas de metales pesados incluyendo el cadmio (39,40).

La contaminación por cadmio en suelos agrícolas es un problema global, estudios han identificado regiones con altos niveles de cadmio en suelos, incluyendo partes de China, India y Europa, en países como Colombia han reportado la presencia de cadmio en cultivos como el cacao (tabla 3), lo que ha llevado a investigaciones sobre su acumulación y a estrategias para mitigar su presencia en la cadena trófica (41).

Tabla 3. Cultivos sensibles a la acumulación y límite de cadmio en alimentos según la FAO

Cultivo	Nombre científico	Órgano donde se acumula cadmio	Riesgo para consumo humano	Límite máx de Cd (mg/Kg)	Ref
Arroz	<i>Oryza sativa</i>	Grano pulido y sin cáscara	Alto	0,1-0,8	(42)
Cacao	<i>Theobroma cacao</i>	Granos secos	Alto (exportación limitada por regulación de la unión europea)	0,4	(43)
Espinaca, lechuga	<i>Spinacia oleracea</i> y <i>Lactuca sativa</i>	Hojas	Moderado o alto	0,2	(44)
Papa	<i>Solanum tuberosum</i>	Tubérculo	Moderado	0,1	(45)
Trigo, maíz	<i>Triticum aestivum</i> L. <i>Zea mays</i> L.	Semilla	Bajo o moderado (acumulación en el salvado)	0,2	(46)

3.4 Biorremediación con microorganismos de suelos contaminados por cadmio

La biorremediación es un mecanismo biológico que busca restablecer un medio contaminado, reduciendo las cargas tóxicas utilizando recursos de ayuda como lo son los microorganismos. Estos han desarrollado sistemas de protección para reducir los efectos de los metales pesados, pero en algunos casos, estos metales llegan a destruir la membrana de los microorganismos, por lo que se requiere que estos sean resistentes para incrementar su efectividad como biorremediadores.

Algunos de ellos son *Daedalea quercina*, un hongo que acumula Cd en sus tejidos, puede tolerar concentraciones significativas de este metal acumulándolo en el micelio, *Aspergillus fumigatus* que lixivia metales pesados, puede absorber eficientemente iones de cadmio en soluciones acuosas siendo influenciado por factores como el pH, el tiempo de contacto y la concentración de la biomasa, *Chlorella vulgaris* esta microalga absorbe Cd por su gran capacidad, lo puede hacer cuando sus células están vivas o inertes en soluciones acuosas logrando alcanzar un 95% en las condiciones óptimas, *Bacillus sphaericus* alta capacidad de acumular Cd intracelular, *Rhizobium pusense* KG2 inmoviliza Cd^{2+} reduciendo considerablemente su disponibilidad para las plantas; investigaciones han evidenciado que pueden inhibir la absorción de Cd por las raíces de plantas como la soja promoviendo su crecimiento y mejorando su tolerancia al metal (47,48).

3.5 Plantas y microorganismos que bioacumulan cadmio

Los efectos tóxicos del cadmio en las plantas van a depender del tipo de especie, afectando el crecimiento y el metabolismo. En su mayoría, estudios reportan la acumulación de cadmio en la parte radicular de la planta, por ejemplo, las plantas de arroz mostraron mayor porosidad y desarrollo de las raíces por la vía apoplástica; en rábanos y zanahorias se inhibió el desarrollo de radicales; en perejil sometido a estrés con cadmio se encontró alto contenido del metal, pero la planta se mantuvo estable visualmente. Además, existe otro tipo de plantas que se denominan hiperacumuladoras y junto a factores como el pH, temperatura y presencia de otros metales, se les va a favorecer la remediación del cadmio, como *Chromolaena odorata*, *Gynura pseudochina*, *Conyza sumatrensis*, y *Nicotiana tabacum*, que fueron colocadas en un campo altamente contaminado con cadmio y efectivamente redujeron la concentración de este en el suelo (49).

Las plantas utilizan varios procesos para realizar la acumulación de metales pesados como el cadmio; en la fitoextracción las familias hiperacumuladoras son *Celosia argentea*, *Salix mucronata*, *Cassia alata*, *Vigna unguiculata*, *Solanum melonaena*, *Momordica charantia*, *Nicotiana tabacum*, *Kummerowia striata* y *Swietenia macrophylla*, quienes han demostrado eficacia, asequibilidad y reducción de la toxicidad de metaloides, pero la mayoría de estas han desarrollado la

capacidad de acumular un solo metal, siendo sensibles a otros elementos. En la fitoestabilización, se ha demostrado que plantas como *Virola surinamensis*, la avena, la mostaza blanca y *Miscanthus x giganteus*, tienen el potencial de fitoestabilizar el cadmio, al inmovilizar toxinas ambientales y reducir la disponibilidad de metales en las plantas (49).

Diversas especies vegetales han sido estudiadas por su potencial en procesos de fitorremediación. Además de contribuir a la recuperación de suelos contaminados, algunas poseen interés económico debido a su aprovechamiento forestal, energético o industrial. La Tabla 4 presenta algunas de las especies con mayor potencial reportadas en la literatura.

Tabla 4. Plantas de interés económico y productivo.

Planta	Potencial económico y productivo
<i>Nicotiana tabacum</i> (tabaco)	Tiene un valor comercial conocido y a pesar de sus implicaciones en salud pública, podría aprovecharse en suelos contaminados con fines de remediación si su biomasa no se utiliza para consumo humano.
<i>Phaseolus vulgaris</i> (frijol)	Especie que ha demostrado eficiencia en la acumulación de cadmio, pero debido a su uso tradicional como un cultivo alimentario, se requiere un enfoque de doble evaluación entre remediación y bioseguridad.
<i>Swietenia macrophylla</i> (caoba)	Aunque es un árbol maderable de alto valor, su capacidad de fitoacumulación lo convierte en una especie interesante para futuros proyectos de remediación forestal a largo plazo.
<i>Brassica juncea</i> (mostaza india)	Ampliamente utilizada en fitorremediación genera biomasa útil para compost no alimentario, puede crecer en ambientes contaminados con metales como cadmio, plomo y zinc.
<i>Cassia alata</i> (sen de alas)	Planta medicinal reconocida con alto potencial fitoacumulador, se ha vuelto interesante como una especie bioindicadora.

Recopilación de información de varios artículos (50,51)

3.6 Mecanismo en el cual las plantas bioacumulan los metales pesados

Por medio de la fitorremediación, las plantas son utilizadas para absorber contaminantes a través del tallo y las raíces, donde transportan el cadmio a partes cosechables de la planta, ya que han desarrollado procesos para mantener crecimiento normal incluso en suelos altamente contaminados; después de la cosecha se exponen a incineración. Las plantas utilizan varios mecanismos para acumular metales pesados, entre ellos, secuestro vacuolar, adsorción a la pared celular, la carga del xilema, el citoplasma, transporte energético, entrada apoplástica de cadmio en los tejidos radiculares, entre otros.

Principalmente se busca que la acumulación y el secuestro se realicen en la parte aérea de la planta, lo que mantiene en bajas concentraciones el cadmio en las raíces (Fig. 2). Estos mecanismos están mediados por enzimas como la P1B-ATPasa que cataliza la hidrólisis de un enlace fosfato de ATP y forma ADP, o por transportadores cuando el cadmio está en su forma iónica, para moverlo desde la raíz (49,52).

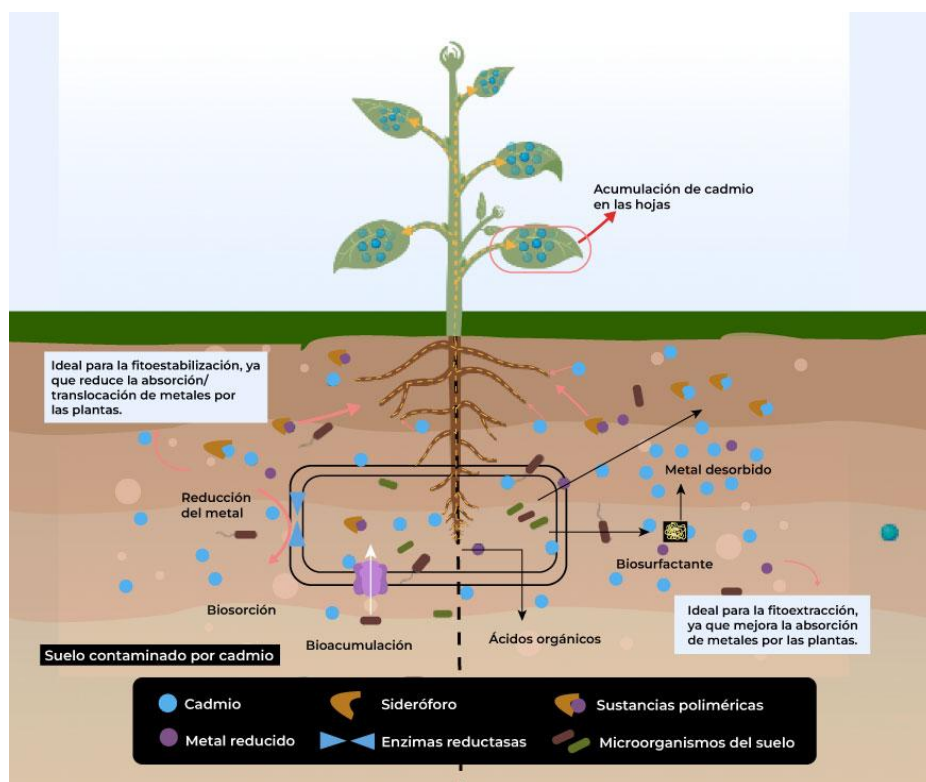


Figura 2. Mecanismo de fitorremediación de cadmio por microorganismos. La producción de sideróforos y sustancias poliméricas por los microorganismos mantienen en forma estable al Cd, lo que facilita su bioacumulación. Adaptado de (49)

El cadmio al no ser esencial para las plantas, ingresa a las células vegetales aprovechando transportadores diseñados especialmente para cationes esenciales para metales que sí necesita la planta como el hierro, zinc y magnesio este se pasa por estos transportadores debido a su similitud química algunos transportadores implicados incluyen los:

- **NRAMPs** este se encarga de la absorción de cadmio en las raíces, **HMA**s este se encarga de la translocación y hace un secuestro intracelular de cadmio dentro de la planta
- **OPTs** contribuyen al transporte de cadmio quelado con péptidos
- **CAXs** involucrados en el almacenamiento de cadmio en compartimentos celulares.

Estudios han revelado que los transportadores de cadmio han experimentado una expansión específica en las plantas vasculares como en el caso de **NRAMPs** el cual presenta una evolución con múltiples linajes ancestrales lo que sugiere eventos de transferencia horizontal de genes y la **HMA**s muestra una evolución derivada de un ancestro común con divergencia entre monocotiledóneas y eudicotiledóneas. Lo que hacen estas adaptaciones evolutivas en las plantas es colonizar suelos ricos en metales pesados, desarrollando mecanismos eficientes para la absorción de cadmio. Si se llega a comprender la evolución y la función de los transportadores, se podrían desarrollar estrategias de fitorremediación por medio de la manipulación genética, se podría mejorar la capacidad de las plantas para acumular el cadmio ofreciendo soluciones sostenibles para la descontaminación de suelos afectados por metales pesados (53).

3.7 Sideróforos

En los procesos de biorremediación de metales pesados, uno de los mecanismos más relevantes empleados por los microorganismos es la producción de sideróforos, son compuestos orgánicos de bajo peso molecular con alta afinidad a iones metálicos. Aunque su función principal es la captación de hierro férrico en

condiciones de baja disponibilidad, múltiples estudios han demostrado que estos compuestos también pueden interactuar con otros metales pesados como el cadmio, zinc, cobre y plomo formando complejos estables que reducen su biodisponibilidad y toxicidad en el ambiente. Este proceso de quelación permite disminuir la movilidad de los metales en el suelo, limitar la absorción por las plantas y en algunos casos facilitar su transformación a formas menos tóxicas (54).

Los sideróforos pueden clasificarse en diferentes tipos según su estructura química, principalmente en catecolatos, hidroxamatos y carboxilatos cada uno con distinta afinidad por metales específicos (tabla 5). En el caso de bacterias del género *Pseudomonas* spp., se destaca la producción de pioverdina, un sideróforo fluorescente con alta capacidad de unión a metales, no solo participa en la captación de hierro sino también en la inmovilización y detoxificación de metales pesados en ambientes contaminados. La producción de sideróforos está estrechamente relacionada con otros mecanismos microbianos como la biosorción, la bioacumulación y la activación de sistemas de transporte y eflujo lo que incrementa la capacidad adaptativa de los microorganismos frente al estrés por metales (29).

Tabla 5. Clasificación de los sideróforos según su estructura química.

Tipo de sideróforo	Grupo funcional principal	Características	Ejemplos	Microorganismos asociados
Catecolatos (fenolatos)	Grupos catecol (-OH fenólicos)	alta afinidad por el hierro y otros metales forman complejos muy estables	Enterobactina	<i>Escherichia coli</i> , <i>Salmonella</i> spp.
Hidroxamatos	Grupos hidroxamato (-CONHOH)	muy comunes en bacterias y hongos buena capacidad de quelación de los metales	Ferrioxamina, desferrioxamina	<i>Streptomyces</i> spp., <i>Bacillus</i> spp.

Carboxilatos	Grupos carboxilo (-COOH)	menor afinidad que otros sideróforos, actúan en condiciones específicas de pH	Rizobactina	<i>Rhizobium</i> spp.
Mixtos	Combinación de varios grupos funcionales	alta versatilidad pueden unirse a varios metales	Pioverdina	<i>Pseudomonas</i> spp.

Adaptado de (29)

Se ha demostrado que la producción de sideróforos puede influir indirectamente en la fitorremediación, al modificar la biodisponibilidad de metales en la rizosfera y favorecer la interacción planta-microorganismo, esto resulta especialmente relevante en sistemas agrícolas, donde estos compuestos contribuyen tanto a la detoxificación del suelo como a la promoción del crecimiento vegetal, en conjunto estos mecanismos posicionan a los sideróforos como una estrategia clave en la biorremediación de suelos contaminados, debido a su capacidad para complejar metales, reducir su biodisponibilidad y facilitar su manejo en el ambiente (56).

3.8 Técnicas para la biorremediación de metales pesados

La biorremediación de metales pesados como el cadmio puede abordarse mediante diferentes técnicas que dependen del sistema en el cual se desarrollan, destacándose principalmente los enfoques *in vitro* e *in vivo*, los cuales presentan diferencias en términos de control experimental, eficiencia y aplicabilidad en campo. Estas técnicas se basan en diversos mecanismos microbianos sobre los metales en el ambiente.

En los sistemas *in vitro*, los ensayos se realizan bajo condiciones controladas de laboratorio, utilizando generalmente soluciones acuosas o medios

de cultivo definidos. Este tipo de metodología permite evaluar de manera precisa la capacidad de los microorganismos para remover metales pesados, controlando variables como el pH, la temperatura, la concentración inicial del metal y el tiempo de exposición. Dentro de estas técnicas se destacan la biosorción, donde los metales se adhieren a la superficie celular mediante interacciones fisicoquímicas; la bioacumulación, en la cual los metales son transportados al interior de la célula; y la bioprecipitación, que implica la transformación de los metales en compuestos insolubles. Asimismo, se incluyen pruebas de lixiviación como el método TCLP, que permite evaluar la movilidad de los metales en matrices sólidas bajo condiciones simuladas.

Por otro lado, los sistemas *in vivo* se desarrollan en condiciones más cercanas a la realidad ambiental, incluyendo suelos contaminados, plantas o sistemas suelo-planta-microorganismo. En estos casos, los microorganismos interactúan con otros factores bióticos y abióticos, lo que puede afectar la eficiencia de remoción del metal. Sin embargo, estos sistemas permiten evaluar la reducción de la biodisponibilidad del cadmio y su impacto en organismos vivos, especialmente en plantas, donde se evidencia una disminución en la acumulación del metal en tejidos vegetales. En este contexto, los mecanismos como la producción de sideróforos, la inmovilización en la rizosfera y la formación de complejos metal-orgánicos juegan un papel fundamental en la reducción de la toxicidad del cadmio.

En términos comparativos, los sistemas *in vitro* suelen presentar mayores porcentajes de remoción debido al alto grado de control experimental, alcanzando eficiencias superiores al 90% en algunos estudios; no obstante, su principal limitación radica en la dificultad para extrapolar estos resultados a condiciones reales. En contraste, los sistemas *in vivo*, aunque pueden mostrar eficiencias menores, ofrecen una visión más realista del comportamiento del metal en el ambiente y permiten evaluar la sostenibilidad de las estrategias de biorremediación a largo plazo. Por esta razón, la combinación de ambos enfoques resulta fundamental para el diseño de estrategias efectivas de remediación de suelos contaminados con cadmio (57).

La adecuada evaluación de las estrategias de biorremediación requiere no

solo analizar la eficiencia de la remoción del metal sino también contar con métodos precisos para la identificación y la cuantificación del cadmio, debido a que este metal puede encontrarse en diferentes fracciones en el suelo, como lo son las formas intercambiables, unidas a materia orgánica o asociadas a minerales lo cual influye a su movilidad y biodisponibilidad, debido a esto se han desarrollado diversas técnicas analíticas que permiten determinar tanto la concentración total como la fracción biodisponible del metal, siendo esta última clave para evaluar su impacto ambiental y su potencial de absorción por parte de las plantas.

Entre los métodos más utilizados y conocidos se puede encontrar la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) y la espectrometría de emisión óptica (ICP-OES), estas técnicas se caracterizan por su alta sensibilidad, precisión y capacidad para detectar metales en concentración traza, estas técnicas permiten cuantificar el contenido total de cadmio en muestras de suelo previamente digeridas, proporcionando información confiable sobre los niveles de contaminación, de igual manera para evaluar la proporción biodisponible del metal se emplean mecanismos de extracción química como el uso de agentes quelantes de tipo DTPA (ácido dietilentriaminopentaacético), que simulan la disponibilidad del metal para las plantas y permiten estimar su movilidad en el sistema suelo-planta. (58,59).

Asimismo, procedimientos como la extracción secuencial permiten fraccionar el cadmio según su forma química y grado de asociación con los componentes del suelo, lo que facilita comprender su comportamiento ambiental y su potencial de remoción mediante procesos de biorremediación. En conjunto, estas técnicas no solo permiten cuantificar el metal, sino también evaluar la efectividad de las estrategias microbianas aplicadas, estableciendo una relación directa entre la disminución de la concentración o biodisponibilidad del cadmio y la acción de los microorganismos en el sistema, en la tabla 6 se observa a profundidad las técnicas empleadas para evaluar las fracciones de cadmio en el suelo (10).

Tabla 6. Técnicas para la determinación de cadmio en el suelo.

Técnica	Tipo de medición	Principio	Aplicación en
---------	------------------	-----------	---------------

biorremediación			
AAS (Espectrometría de Absorción Atómica)	Concentración total de Cd	Absorción de radiación por átomos en estado gaseoso	Determinar niveles iniciales y finales de contaminación
ICP-MS (Espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente)	Cd en trazas (muy bajas concentraciones)	Ionización en plasma y detección por masa	Alta precisión para evaluar eficiencia de remoción
ICP-OES (Espectrometría de emisión óptica)	Concentración total multielemental	Emisión de luz por átomos excitados en plasma	Análisis simultáneo de varios metales
Extracción con DTPA	Cd biodisponible	Quelación química que simula absorción por plantas	Evaluar movilidad y riesgo biológico
Extracción secuencial	Fracciones del Cd	Separación según unión a componentes del suelo	Analizar estabilidad y cambios tras biorremediación

Adaptado de (58,59)

3.9 Microorganismos involucrados en la remoción del cadmio

Las bacterias que se encuentran en el suelo juegan un papel muy importante en el ciclo biogeoquímico de los metales pesados; algunas de estas bacterias pueden absorber y almacenar cadmio en su interior o en estructuras celulares externas, reduciendo su biodisponibilidad. Algunos géneros importantes se mencionan en la tabla 7.

Tabla 7. Géneros microbianos biocumuladores de cadmio

Género	Mecanismo principal	Aplicación potencial
<i>Bacillus</i> spp.	Biosorción en pared celular, bioacumulación intracelular, producción de metalotioneínas.	Biorremediación de suelos agrícolas.
<i>Pseudomonas</i> spp.	Producción de sideróforos, transporte activo y acumulación intracelular.	Inoculantes rizosféricos.
<i>Cupriavidus</i>	Genes de resistencia a metales, biocumulación activa.	Remediación de suelos industriales.
<i>Azomonas</i>	Remoción de cadmio del medio, acumulación celular.	Sistemas agrícolas contaminados.
<i>Lysinibacillus</i>	Adsorción superficial, biosorción.	Tratamientos biotecnológicos.
<i>Klebsiella</i>	Bioacumulación y tolerancia en la rizosfera.	Trabaja en consorcio microbianos.
<i>Enterobacter</i>	Inmovilización y acumulación intracelular.	Reducción de biodisponibilidad.
<i>Rhizobium</i>	Inmovilización en rizosfera, quelación.	Protección de cultivos.
<i>Aspergillus</i>	Biosorción por quitina, acumulación intracelular.	Micorremediación.
<i>Penicillium</i>	Adsorción y precipitación mediante metabolitos.	Recuperación de suelos.
<i>Trichoderma</i>	Inmovilización en el micelio, interacción planta-hongo.	Biofertilizantes y biorremediación.

Recopilación de información adaptada de (60,61)

3.10 Características generales de *Pseudomonas* spp.

Pseudomonas spp. es un grupo de microorganismos encontrados en diversos lugares como el desierto, suelos agrícolas, pastos y plantas, fuentes hídricas, seres humanos y hospitales. Es capaz de metabolizar un amplio rango de

compuestos orgánicos e inorgánicos y altamente resistente a metales pesados, antibióticos, detergentes y solventes. Son bacilos gram negativos aerobios, quimioheterótrofos, pertenecientes al reino Pseudomonadati (tabla 8) (10,62).

Tabla 8. Taxonomía de *Pseudomonas* spp.

Clasificación taxonómica de <i>Pseudomonas</i> spp.	
Dominio	Bacteria
Reino	Pseudomonadati
Filo	Pseudomonadota
Clase	Gammaproteobacteria
Orden	Pseudomonadales
Familia	Pseudomonaceae
Género	<i>Pseudomonas</i>

Adaptado de (63)

Son ampliamente utilizadas como control biológico y biofertilizantes, ya que estimulan resistencia inducida, utilizan las raíces de las plantas como fuente de nutrientes, son fáciles de cultivar *in vitro*, producen metabolitos que cumplen funciones secundarias, están presentes en suelo de forma abundante y pueden ser modificadas genéticamente para mejorar su potencial (64).

Produce polisacáridos extracelulares que poseen grupos funcionales los cuales son carboxilos, hidroxilos y aminos que se unen a metales como cadmio, plomo, cobre y zinc, lo que permite generar resistencia contra estos, incluso mejorar el crecimiento bacteriano (8).

3.11 *Pseudomonas* spp. en el secuestro de metales

Las bacterias del género *Pseudomonas* se destacan por su alta capacidad para participar en procesos de biorremediación de metales pesados, debido a la diversidad de mecanismos que emplean para el secuestro, transformación e inmovilización de estos contaminantes. Entre estos mecanismos se incluyen la

biosorción a través de componentes de la pared celular, la producción de exopolisacáridos y sideróforos, la bioacumulación intracelular y la activación de sistemas de transporte como bombas de eflujo. Estas estrategias permiten a *Pseudomonas* spp. adaptarse a ambientes altamente contaminados, reduciendo la biodisponibilidad y toxicidad de metales como el cadmio. Además, su versatilidad metabólica y capacidad de respuesta al estrés ambiental la convierten en uno de los géneros más estudiados y prometedores para aplicaciones en la remediación de suelos y aguas contaminadas (13).

La cepa de *Pseudomonas* AN-B15 activa genes que codifican la síntesis de polisacáridos extracelulares, estas moléculas forman una biopelícula mucosa fuera de la célula, el cadmio al ser un ion positivo se une a los grupos funcionales negativos como carboxilos y fosfatos presentes en los exopolisacáridos como resultado el cadmio queda fuera de la célula impidiendo su ingreso y reduciendo su toxicidad. La bacteria modula la expresión de proteínas transportadoras como las bombas de eflujo tipo Cz cCBA y transportadores ATPasa (fig. 3), estos sistemas expulsan activamente iones de cadmio que pudieron haber ingresado a la célula, evitando su acumulación intracelular, de igual manera la cepa activa genes relacionados con la defensa contra especies reactivas de oxígeno como el superóxido dismutasa catalasas que mitigan el daño oxidativo inducido por el cadmio (62).

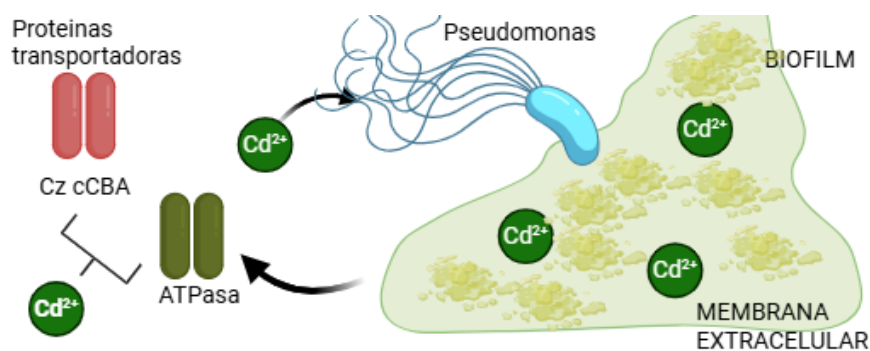


Figura 3. Expresión de proteínas transportadoras como las bombas de eflujo tipo Cz cCBA y transportadores ATPasa, estos sistemas expulsan activamente iones de cadmio que pudieron haber ingresado a la célula, evitando su acumulación intracelular. Realizada en BioRender.

La metalotioneína de *Pseudomonas putida* es una proteína de bajo peso

molecular, rica en residuos de cisteína lo que le otorga una alta afinidad por los iones metálicos como el cadmio y el plomo debido a su naturaleza hidrofílica y la presencia de residuos cargados negativamente facilitan la unión a estos metales actúa como una especie de esponja molecular atrapándolos y formando complejos metal-tiol muy estables una vez que se unen los metales quedan almacenados dentro de la célula en comportamientos seguros como el citoplasma o las vacuolas o estos son dirigidos hacia su excreción o inmovilización esto lo que previene los daños en el ADN, proteínas y las membranas celulares (13).

3.12 *Pseudomonas* spp. como biorremediador de cadmio

Bacterias gram negativas como *Pseudomonas* spp. tienen la capacidad de absorber metales dependiendo de su límite de tolerancia, es decir, de cuánto pueden resistir para sobrevivir (11). El cadmio puede entrar de diversas formas a la pared celular de las bacterias, entre ellas a través del sistema de captación de cationes divalentes como Zn^{2+} y Mn^{2+} , amplificación genética, eflujo activo de Cd y transcripción mejorada de genes de metalotioneína. El eflujo activo de Cd puede darse principalmente por sistemas de RND (Resistencia, Nodulación, División) como *czc* usado con el zinc, pero con el homólogo de este grupo de genes llamado *czr*, encontrado en el cromosoma CMG103 de *P. aeruginosa* (10,65).

Pseudomonas aeruginosa posee dos genes principales relacionados con la resistencia al cadmio:

- **cadR** codifica un regulador transcripcional que detecta la presencia de cadmio en el entorno y activa la expresión de genes de resistencia.
- **cadA** codifica una ATPasa tipo p que transporta activamente iones de cadmio desde el citoplasma hacia el exterior de la célula, utilizando energía derivada de la hidrólisis de ATP, estos genes trabajan en conjunto para detectar y eliminar el cadmio, protegiendo así a la célula de su toxicidad.

El funcionamiento de CadA captura el ion cadmio en el citoplasma a través de su sitio de unión específico en el dominio N-terminal se une y se hidroliza el ATP para generar la energía necesaria para el transporte activo de cadmio lo que ocasiona la liberación de energía, luego se hace un cambio conformacional de la proteína que transfiere el ion cadmio desde el interior celular hacia el exterior a través del canal

transmembrana y por último hace una regeneración del estado inicial de la proteína para poder repetir el ciclo (66).

En diversos estudios se han expuesto las formas en que *Pseudomonas* realiza el proceso de biorremediación de contaminantes tóxicos como el cadmio, en conjunto con las plantas, se da la producción de fitohormonas, compuestos relacionados con el crecimiento y desarrollo de las plantas, que van a ser importantes para resistir el estrés generado por la contaminación de metales pesados. Algunas de estas hormonas son las AIA, las giberelinas y las auxinas, que en el caso de *Pseudomonas fluorescens* van a mejorar la absorción de Cd en plantas, modulando su expresión y genes transportadores, además, reducen la toxicidad de estos metales como se muestra en la figura 3 (8).

Estas bacterias pueden producir sustancias capaces de interferir en los procesos de biorremediación, uno de estos son los ramnolípidos, una clase de biosurfactante aplicado como potencial remediador ambiental e industrial, que ha tenido relación con la contaminación por Cd al influir en la síntesis de estos, así como en la expresión de *rhlB* en la fase estacionaria, complementando su funcionamiento (10).

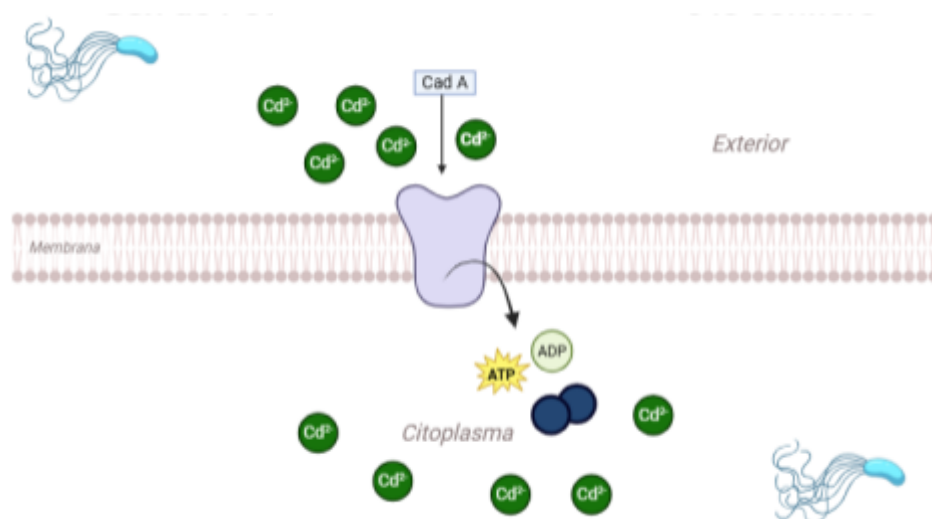


Figura 4. Gen de *Pseudomonas aeruginosa* que le confiere resistencia al cadmio. Realizada en BioRender, adaptada de (53)

3.13 Características de *Bacillus* spp.

Son bacterias Gram positivas aunque pueden llegar a ser Gram variables y de forma bacilar o ligeramente curvado, perteneciendo a la familia *Bacillaceae* (tabla 9) mide entre 0,5-2,5 micras de ancho y de 1-10 micras de largo presentan flagelos peritricos en la mayoría de las especies, poseen pared celular gruesa de peptidoglicano con ácidos teicoicos lo que les da resistencia mecánica y sitios activos para la unión de metales pesados; la pared celular rica en grupos carboxilo, fosfato y amino permite la absorción iónica de cadmio, plomo, zinc y cobre, producen exopolisacáridos que pueden atrapar metales y reducir su biodisponibilidad (67).

Tabla 9. Taxonomía de *Bacillus* spp.

Clasificación taxonómica de <i>Bacillus</i> spp.	
Dominio	Bacteria
Reino	Bacillati
Filo	Bacillota
Clase	Bacilli
Orden	Bacillales
Familia	Bacillaceae
Género	<i>Bacillus</i>

Adaptada de (68)

Este grupo de microorganismos hacen una producción de metabolitos promotores del crecimiento vegetal, como el ácido indolacético que estimula el desarrollo radicular, solubiliza el fósforo y el potasio mejorando la nutrición vegetal, producción de sideróforos que captan hierro y pueden competir con metales tóxicos

y realizan fijación biológica de nitrógeno, esta familia de microorganismos producen antibióticos naturales contra hongos fitopatógenos, sintetizan enzimas líticas que degradan paredes celulares de patógenos. Están presentes en suelos, aguas dulces y saladas, sedimentos, polvo y aire, se adaptan a condiciones extremas, forman biofilms estables sobre las raíces, rocas y partículas de suelo, lo que les permite resistir arrastre y aumentar la interacción con contaminantes como el cadmio (69).

3.14 *Bacillus* spp. en el secuestro de metales

Gracias a su alta biosorción, bioacumulación y transformación de metales pesados, este microorganismo ha sido estudiado en varias ocasiones como una herramienta en la biorremediación especialmente en ambientes contaminados con metales como cadmio, plomo, cobre, zinc, níquel, manganeso y uranio, *Bacillus* spp. tiene una alta capacidad de remoción, dependiendo la cepa que sea utilizada tiene diferente especificidad y eficiencia con estos metales pesados como se observa en la tabla 10, de igual manera tiene varios mecanismos por los cuales es capaz de secuestrar metales pesados, como:

- Biosorción pasiva: fijan los iones metálicos a la superficie celular mediante interacciones con grupos funcionales como los fosfatos, carboxílicos y amidas, estudios han comprobado con *Bacillus cereus* y *Bacillus subtilis* remociones mayores del 90% de plomo y cadmio en medios acuosos incluso sin una actividad metabólica solo dependiendo de la composición de la pared celular de la bacteria.
- Bioacumulación activa: transportan e incorporan intracelularmente los metales durante el metabolismo, este mecanismo fue comprobado en *Bacillus circulans* y *Bacillus sphaericus* con una alta retención de magnesio y zinc.
- Producción de metabolitos asociados a la remediación: *Bacillus cereus* produce auxinas y solubilizadores de fósforo que además de facilitar la absorción de metales, mejoran el crecimiento vegetal en suelos contaminados.

Tabla 10. Eficiencia y especificidad por metal

Metal	Eficiencia y especificidad
Cadmio	<i>Bacillus subtilis</i> ha demostrado eficiencias de remoción del 92.3% en soluciones acuosas y reduciendo la biodisponibilidad en el suelo en cultivos de arroz de un 26%.
Plomo	En cepas como <i>Bacillus cereus</i> absorben hasta el 96.8% en condiciones controladas en recuperación de suelos agrícolas.
Uranio	<i>Bacillus aryabhatai</i> demostró un secuestro del 70% de uranio en solo 6 horas, dando lugar a un gran potencial en entornos mineros.
Metales mixtos	<i>Bacillus sphaericus</i> y <i>Bacillus circulans</i> son útiles para efluentes industriales con múltiples contaminantes han tenido una alta capacidad de remoción simultánea de manganeso, zinc, cobre, níquel y cobre.

Adaptado de (70–73)

3.15 *Bacillus* spp. como biorremediador de cadmio

Bacillus spp. al destacarse por su eficiencia en el secuestro, inmovilización y detoxificación del cadmio, es uno de los microorganismos más utilizados en la biorremediación microbiana, este género de bacterias utiliza varios mecanismos de biorremediación; bio absorben el metal en la pared celular, debido a que está compuesta de peptidoglicano y ácidos teicoicos posee grupos funcionales que son capaces de unirse a los iones de cadmio presentes en el suelo. Muchas de las cepas transportan el cadmio al interior celular donde lo inmovilizan por medio de proteínas quelantes como las metalotioneínas evitando su toxicidad, regulando su disponibilidad y reduciendo su toxicidad para las plantas y microorganismos benéficos (74).

Bacillus spp. es muy importante en la biorremediación de cadmio ya que forman endosporas que les confiere resistencia a condiciones extremas, lo que lo hace soportar concentraciones elevadas de metales y garantiza una alta efectividad en ambientes contaminados; muchas bacterias de este género

funcionan como promotoras del crecimiento vegetal mejorando la productividad de los cultivos y reduciendo la absorción del cadmio en los mismos, también pueden biorremediar aguas y sedimentos lo que ayuda a incorporar al sistema cepas autóctonas adaptadas a estos entornos (70).

En la contaminación por cadmio en suelos, estudios han mencionado que se debe contar con metodologías que permitan evaluar tanto su concentración total como su fracción biodisponible, ya que esta determina su impacto sobre los organismos vivos. Se han utilizado diferentes métodos para identificar la presencia y comportamiento de este metal, incluyendo técnicas de extracción química selectiva y ensayos de lixiviación como el método TCLP, que simula condiciones ambientales para estimular la movilidad del contaminante, de igual manera en estudios de laboratorio se utilizan diseños experimentales *in vitro* que permiten evaluar la capacidad de remoción de microorganismos bajo condiciones controladas de pH, temperatura y concentración inicial del metal.

Estas metodologías suelen complementarse con la medición de la concentración de cadmio mediante técnicas instrumentales y el seguimiento de variables como crecimiento microbiano y eficiencia de remoción en el tiempo. El uso de herramientas analíticas y experimentales permite comprender de forma integral la dinámica del cadmio en el suelo y la efectividad de las estrategias de biorremediación, lo que constituye la base para el desarrollo del diseño metodológico del presente estudio.

4. DISEÑO METODOLÓGICO

4.1 Tipo de estudio

El estudio realizado fue de tipo descriptivo, documental y cualitativo, basado en el análisis sistemático de registros experimentales *in vitro* de laboratorio.

4.2 Recopilación de literatura

Para esta monografía, se realizó una búsqueda sistemática en bases de datos, mediante la metodología PICO (Paciente o Problema, Intervención, Comparación y Outcome) para delimitar y estructurar el problema de estudio, a través de diversos criterios de inclusión y exclusión; de esta forma encontrar

artículos que sirvieran de base para la construcción, comparación y análisis del tema propuesto sobre el potencial biorremediador *in vitro* en suelos contaminados por cadmio a través de microorganismos como *Pseudomonas* spp. y *Bacillus* spp.

Se realizó la búsqueda bibliográfica en motores de búsqueda y bases de datos especializadas, como Google Scholar, Science Direct, SpringerLink, MDPI, además de otros gestores de búsquedas como Google y el Repositorio de la Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, entre otras, por medio de palabras claves en español e inglés, que tuvieran alguna relación al tema propuesto como “biorremediación de suelos contaminados por metales”, “biorremediación de cadmio”, “biorremediación de cadmio con *Pseudomonas*”, “Biorremediación de cadmio con *Bacillus*”, “biorremediación con *Bacillus*”, “bioremediation of soils with cadmium”, “*Pseudomonas* in the bioremediation”, “bioremediation of soils”, “*Bacillus* and bioremediation”. Además, esta búsqueda incluyó conectores booleanos que facilitaran la selección o exclusión de dichos artículos, como “AND” o “OR”, para mejorar la precisión de los resultados.

Los artículos encontrados fueron evaluados mediante lectura y revisión de su contenido, seleccionando aquellos que brindaban información relevante para el análisis del tema. La selección se orientó a documentos que hablaban de los mecanismos de remoción, inmovilización o secuestro del cadmio por parte de *Pseudomonas* spp. y *Bacillus* spp., así como estudios experimentales *in vitro* y revisiones científicas recientes.

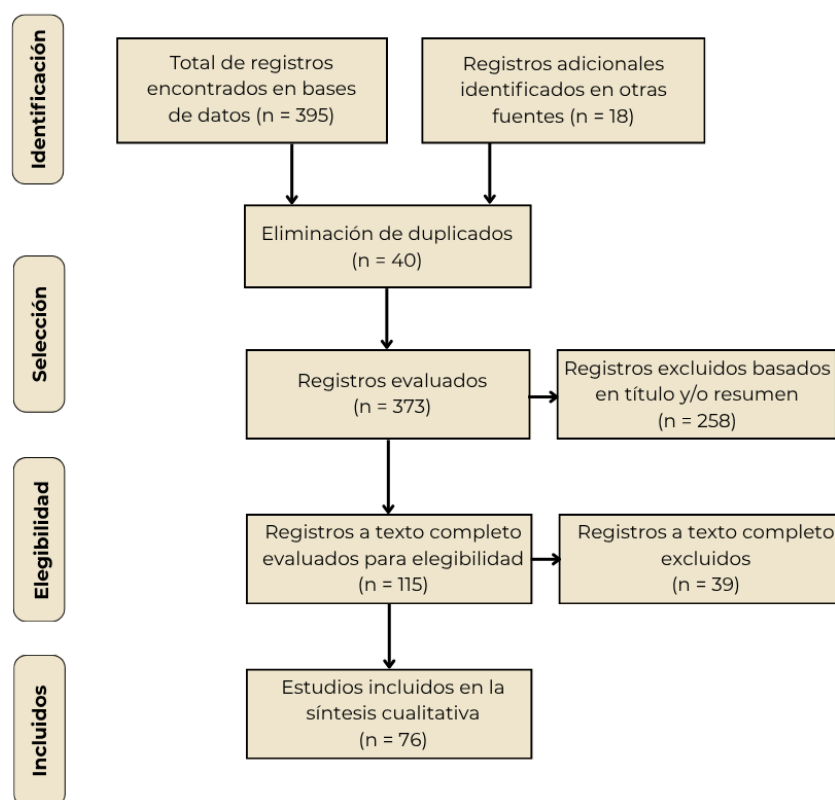


Figura 5. Algoritmo utilizado en la selección de literatura científica
Elaboración propia

Finalmente, los artículos seleccionados fueron organizados mediante el software bibliográfico Zotero, permitiendo estructurar correctamente las referencias y garantizar un adecuado soporte académico. La información recopilada fue analizada identificando patrones comunes y diferencias en los mecanismos de acción microbiana, con el fin de establecer las posibles rutas de biorremediación o inmovilización del cadmio y discutir las condiciones experimentales en las cuales se reportaron mejores resultados. El presente trabajo se centra en la revisión de información ya publicada, se tuvieron en cuenta los principios éticos con el uso adecuado de las fuentes académicas citando correctamente cada artículo y se procuró la fidelidad de los datos y resultados expresados por los autores originales.

4.3 Criterios de inclusión

Los criterios de inclusión hacen referencia a los aspectos que se tuvieron presentes para seleccionar y destacar la información relevante para el documento, dónde se incluyeron estudios y revisiones realizados o publicados entre 2018 a

2026, en formato de artículo, algunos trabajos de grado e investigaciones con idioma inglés original y algunos en español. Además, la búsqueda incluía que los documentos estuvieran disponibles en las bases de datos utilizadas para poder realizar el análisis de observación, lectura y referenciación.

4.4 Criterios de exclusión

Se excluyen publicaciones que no tuvieran relación directa con el objetivo principal del proyecto o que no aportaran evidencia útil sobre la capacidad biorremediadora de los microorganismos seleccionados. Además, documentos que estuvieran fuera del rango del año de publicación entre 2018 - 2026.

4.5 Universo, población, muestra

4.5.1 Universo

Corresponde a todos los artículos, documentos, trabajos de grado, publicaciones académicas y científicas, estudios, investigaciones, revisiones y normativas sobre la biorremediación de suelos contaminados por metales pesados.

4.5.2 Población

Se incluyeron documentos, investigaciones, publicaciones académicas y científicas de bases de datos reconocidas acerca de la biorremediación de suelos contaminados por cadmio con microorganismos.

4.5.3 Muestra

Finalmente, se tuvo en cuenta todos los documentos que se encontrarán disponibles en bases de datos de libre acceso, correspondientes a publicaciones científicas entre los años 2018 - 2026, predominantemente en inglés, pero también en español, de diferentes países que llevarán a cabo estudios de casos con efectividad en el tema de biorremediación de suelos contaminados por cadmio con el uso de microorganismos como *Pseudomonas* spp. y *Bacillus* spp.

4.6 Hipótesis, variables, indicadores

4.6.1 Hipótesis

¿Cuál es la capacidad de *Pseudomonas* spp. y *Bacillus* spp. para remover o inmovilizar cadmio en suelos contaminados en condiciones *in vitro* y por qué son microorganismos considerados elegibles para la restauración de suelos?

4.6.2 Variables

Para evaluar el cumplimiento de la hipótesis, se establecieron variables descritas en la tabla 11.

Tabla 11. Variables implementadas en la revisión.

Nombre de la variable	Definición	Tipo	Escala de medición
Tipo de microorganismo	Bacterias implicadas en los procesos de biorremediación y bioacumulación	Independiente	Género o grupo de microorganismos
Tasa de remoción o eliminación	Porcentaje equivalente de eliminación de cadmio en suelos contaminados	Independiente	Porcentaje
Factores influyentes	Condiciones fisicoquímicas y ambientales que afectan la capacidad de remoción de cadmio (pH, temperatura, concentración inicial, tiempo de exposición)	Independiente	pH, °C, mg/kg, horas/días
Otros organismos implicados	Hongos, plantas u otros microorganismos asociados en procesos de remediación de cadmio	Independiente	Género o grupo biológico

Contaminación por cadmio	Presencia y concentración de cadmio en el suelo o ambiente evaluado	Dependiente	mg/kg, ppm, mg/L
Bioacumulación y biorremediación	Capacidad de los microorganismos para absorber, inmovilizar o remover cadmio del medio contaminado	Dependiente	mg/g biomasa, porcentaje de remoción

Elaboración propia

4.6.3 Indicadores

Entre los indicadores se colocaron parámetros cualitativos y cuantitativos que permitieran evaluar o medir las variables anteriormente mencionadas, como: la disminución de Cd en el suelo, actividad enzimática del suelo, porcentaje de remoción de Cd, densidad óptica.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La revisión bibliográfica permitió identificar 413 documentos inicialmente, de los cuales 76 cumplieron los criterios de inclusión establecidos. Los estudios procedieron de más de 25 países, predominando China e India, y fueron publicados principalmente en idioma inglés. Asimismo, el 89 % correspondió a artículos científicos, evidenciando el creciente interés internacional por la biorremediación de suelos contaminados con cadmio y el desarrollo de estrategias sostenibles para su control.

En cuanto a los resultados obtenidos, se encontró y se relacionaron los temas más importantes de los estudios en la figura 6, donde el tema principal fue el cadmio, demostrando la relevancia que ha tenido para ser objeto de estudio y la necesidad de seguir investigando su efecto contaminante en suelos, para lograr implementar estrategias a gran escala y reducir el impacto que ha generado en los ecosistemas.

Principales temas

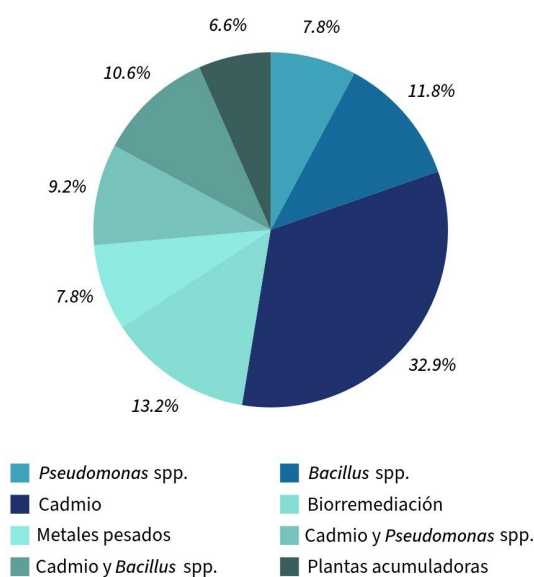


Figura 6. Principales temas de los estudios seleccionados para la monografía.

Elaboración propia

En cuanto a los países de origen de los estudios, se identificó gran variedad al haber más de 25 países representados, donde los principales 5 se reflejan en la figura 7, estando China en primer lugar con 19 artículos (25%), seguido de India

con 7 artículos (9,2%) y cuatro países con 4 artículos (5,2%), demostrando que la biorremediación de suelos contaminados por cadmio es un estudio a nivel mundial ampliamente reconocido y que es importante seguir investigando para encontrar soluciones escalables. Además, los principales países se encuentran localizados geográficamente en el oriente lo que sugiere que la marcada industrialización, la intensa actividad minera y agrícola, han contribuido a la persistencia de cadmio en suelos en áreas densamente pobladas, como en el estudio de Hou y colaboradores en 2025, en el que el rango de Cd es el más alto en el mundo, alcanzando el 9%, marcando el sitio como el corredor enriquecido con metales, que incluye gran parte de Asia y Europa (40).

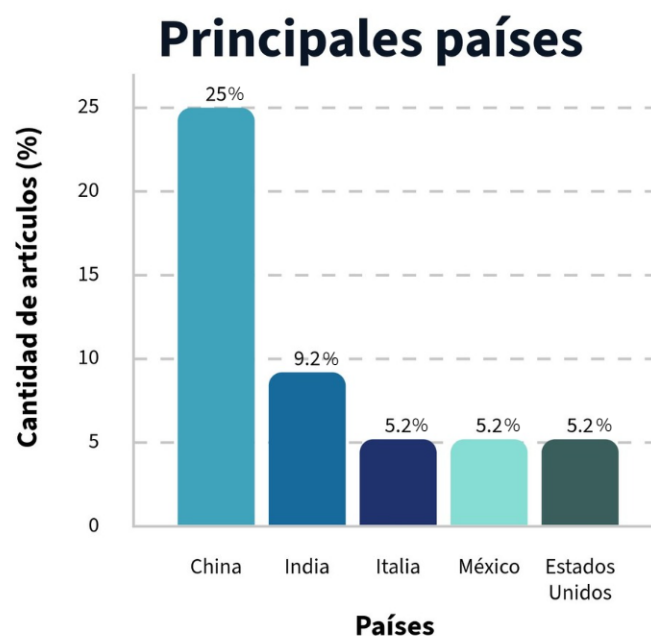


Figura 7. Principales países de origen. Elaboración propia

Dentro de los criterios de inclusión se consideró el idioma original de las publicaciones (fig. 8), donde el 81% son en inglés y 19% en español, lo que demuestra principalmente el gran avance en lugares altamente especializados en la publicación de documentos científicos, el gran avance global, la actualización de investigaciones, lo que permite que no haya un sesgo o sean ignorados estudios de gran relevancia.

Idioma

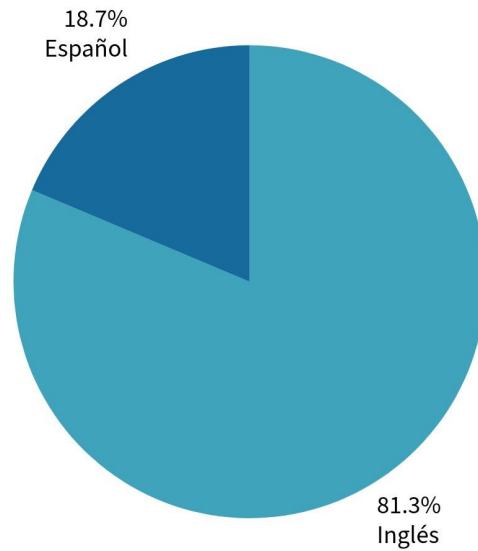


Figura 8. Idiomas originales de publicación. Elaboración propia

De las 76 referencias recuperadas, se determinó el tipo de publicación en porcentajes, siendo 88,1% artículos científicos, 2,6% documentos oficiales, 2,6% capítulos de revista, 5,2% documentos académicos (figura 9). Esto resulta importante para visualizar el gran impacto que tiene la investigación en biorremediación de suelos contaminados por cadmio y los enfoques sostenibles para mitigar su presencia contaminante.

Tipo de publicación

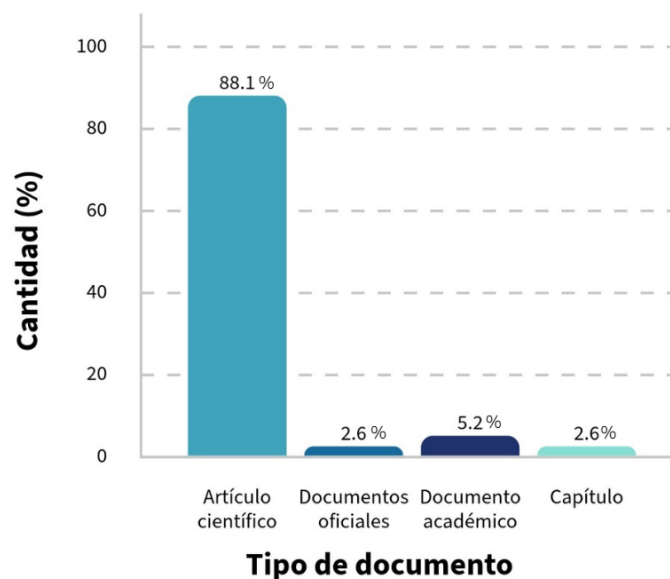


Figura 9. Tipo de publicación. Elaboración propia

A partir del análisis de los estudios seleccionados, se identificaron patrones consistentes en la capacidad de remoción del cadmio e inmovilización por diferentes microorganismos, especialmente especies pertenecientes a los géneros *Pseudomonas spp.* y *Bacillus spp.* Los resultados evidencian que la eficiencia de estos procesos dependen de factores como la concentración inicial del metal, el tiempo de exposición, el pH, la humedad y el tipo de matriz ambiental evaluada.

En términos cuantitativos, la eficiencia de remoción del cadmio presentó una amplia variabilidad entre los estudios analizados, con valores comprendidos entre 32,27% y 98%, dependiendo de la especie microbiana y las condiciones experimentales empleadas. Los mayores porcentajes de remoción se observaron generalmente en sistemas *in vitro* y soluciones acuosas controladas, donde fue posible regular variables fisicoquímicas que influyen directamente en el comportamiento del metal y en la actividad metabólica de los microorganismos. (25,26).

Los resultados mostraron que las especies de *Pseudomonas spp.* presentan una elevada capacidad de biosorción y bioacumulación, como por ejemplo *Pseudomonas aeruginosa* alcanzó porcentajes de remoción cercanos al 94,7% en sistemas acuosos, mientras que *Pseudomonas putida* logró eficiencias aproximadas del 75% en condiciones experimentales controladas. Asimismo, *Pseudomonas nitroreducens* demostró una reducción significativa de la absorción de cadmio por las plantas, disminuyendo la bioacumulación del metal en tejidos vegetales. Estos resultados sugieren que la producción de sideróforos, la formación de biopelículas y la acumulación intracelular constituyen mecanismos determinantes en la reducción de la biodisponibilidad del cadmio (10,11).

Por otra parte, las especies de *Bacillus spp.* mostraron porcentajes de remoción e inmovilización entre 71,26% y 97,3%. *Bacillus Vietnamensis 151-6* alcanzó aproximadamente un 91% de remoción en sistemas asociados a plantas de arroz, mientras que *Bacillus subtilis* logró reducir hasta un 97,3% la lixiviación del metal en sedimentos contaminados. Estos resultados evidencian la capacidad de este género para tolerar elevadas concentraciones de cadmio y favorecer

procesos de inmovilización mediante biosorción, precipitación e interacción con compuestos minerales presentes en el suelo.

Al comparar ambos géneros bacterianos, se observa que *Pseudomonas spp.* presenta ventajas relacionadas con la rápida remoción del metal en sistemas acuosos y con su capacidad para producir sideróforos que complejan los iones metálicos. En contraste *Bacillus spp.* destaca por su resistencia ambiental, atribuida principalmente a la formación de endosporas y a su capacidad de mantener la actividad metabólica bajo condiciones de estrés, estas diferencias sugieren que ambos géneros poseen mecanismos complementarios que podrían aprovecharse de manera conjunta en programas de biorremediación.

Los resultados también evidenciaron que la eficiencia de remoción disminuye cuando los microorganismos son evaluados en sistemas más complejos, como suelo-planta o micro parcelas experimentales. Zhang y colaboradores reportaron una remoción del 71,26 % utilizando *Bacillus cereus* en condiciones más cercanas a la realidad ambiental, observando que factores como el pH, la temperatura y la humedad influyen significativamente en la respuesta biológica. Esto demuestra que los resultados obtenidos en laboratorio no siempre pueden extrapolarse directamente a condiciones reales de campo (18).

En este sentido, la Tabla 12 permite evidenciar que los porcentajes más elevados de remoción se presentan principalmente en sistemas altamente controlados, mientras que en condiciones ambientales complejas predominan procesos de inmovilización y reducción de la biodisponibilidad del metal. Lo anterior indica que el éxito de la biorremediación no depende únicamente de la especie microbiana utilizada, sino también de las características fisicoquímicas del entorno y del mecanismo biológico involucrado (24).

Tabla 12. Eficiencia de remoción de cadmio por microorganismos.

Microorgani smo	Condicio n experime ntal	Concentra ción inicial de Cd	Remoció n (%)	Tiempo	Técnic a de medici ón	Observacio nes
--------------------	-----------------------------------	------------------------------------	------------------	--------	--------------------------------	-------------------

<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Solución acuosa	0,9 mM	94,7%	60 min	AAS	Alta biosorción en lodo activado
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	0,9 mM Cd	0,9 mM	75% acumulación	48 h	ICP	Alta bioacumulación en biomasa
<i>Bacillus spp.</i>	Solución CdCl ₂	200–300 ppm	Alta remoción	No especificado	AAS	Alta tolerancia a Cd
<i>Bacillus megaterium</i>	CdCl ₂ (1951 mg/kg)	1951 mg/kg	24,09%	No especificado	ICP-OES	Mejora hasta 62% con biochar
<i>Pseudomonas putida</i>	Sistema modificado	No especificado	75%	24 h	ICP-MS	Mayor eficiencia en cepas modificadas
<i>Bacillus vietnamensis</i> 151-6	Planta de arroz	No especificado	91% (remoción total)	72 h	ICP-MS	Reducción en tejidos vegetales
<i>Pseudomonas nitroreducens</i>	Suelo contaminado (>50 mg/kg)	>50 mg/kg	Reducción significativa	No especificado	AAS	Disminuye bioacumulación en plantas
<i>Bacillus cereus</i>	Microparc las	No especificado	71,26%	No especificado	ICP	Influencia de pH y temperatura
Consorcio microbiano	Suelo agrícola	Variable	Alta inmovilización	No especificado	DTPA + ICP	Reduce biodisponibilidad

<i>Bacillus subtilis</i>	Sedimentos (TCLP)	No especificado	97,3% (lixiviación)	No especificado	TCLP (EPA)	Alta estabilidad ambiental
<i>Pseudomonas</i> sp.	Suelo contaminado	5,27 ± 0,32 mg/kg	98%	3 semanas	AAS	Absorción y bioacumulación

Información recopilada de (10,11,18,24–26,29,75)

Adicionalmente, Olivo y colaboradores resaltan el potencial de los consorcios microbianos como una alternativa prometedora para incrementar la eficiencia de remediación. La interacción entre diferentes microorganismos favorece mecanismos complementarios como biosorción, bioacumulación, precipitación y modificación de las condiciones fisicoquímicas del suelo, permitiendo una mayor estabilidad del proceso y una reducción más eficiente de la biodisponibilidad del cadmio. Por lo tanto, *Bacillus* spp. y *Pseudomonas* spp. son los géneros mayormente eficientes para crear estos consorcios por su alta capacidad de remoción mediante los mecanismos que han desarrollado (28).

La elevada eficiencia observada de *Pseudomonas* spp. y *Bacillus* spp. se encuentra asociada a diferentes mecanismos moleculares y fisiológicos. Mathivanan destaca que *Pseudomonas* spp. produce sideróforos, polisacáridos extracelulares y biopelículas que favorecen la captura y retención del cadmio, mientras que algunas especies como *Pseudomonas putida* producen metalotioneínas capaces de unirse a metales pesados y disminuir su toxicidad intracelular. Por su parte, *Bacillus* spp. presenta mecanismos asociados a la formación de endosporas, biosorción superficial y producción de compuestos promotores del crecimiento vegetal que contribuyen indirectamente a la reducción del impacto del metal en los ecosistemas (13).

Finalmente, la evidencia científica recopilada demuestra que *Pseudomonas* spp. y *Bacillus* spp. constituyen alternativas biotecnológicas prometedoras para la remoción e inmovilización del cadmio en suelos contaminados. Sin embargo, la mayoría de los estudios disponibles han sido desarrollados bajo condiciones controladas de laboratorio, lo que limita la extrapolación de los resultados a

escenarios reales. Además, la heterogeneidad metodológica observada entre las investigaciones dificulta la comparación directa de los porcentajes de remoción reportados. Por esta razón, se requieren estudios estandarizados y ensayos a escala piloto que permitan validar el potencial de estos microorganismos en condiciones ambientales reales y facilitar su futura implementación en programas de restauración de suelos contaminados (10, 25).

6. CONCLUSIONES

Los consorcios bacterianos son mucho más apropiados para la biorremediación de suelos agrícolas contaminados con metales pesados, debido a su estabilidad y sinergia; para una mayor eficiencia se pueden realizar consorcios entre *Bacillus* spp. y *Pseudomonas* spp. potenciando la eficiencia de remoción manteniendo la sustentabilidad biológica del suelo.

Los resultados analizados permiten inferir que mecanismos microbianos como la producción de sideróforos desempeñan un papel fundamental en la biorremediación del cadmio, al favorecer la formación de complejos estables que reducen su biodisponibilidad y movilidad en el suelo, contribuyendo así a la disminución de su impacto ambiental.

Los avances en investigación que han implementado microorganismos como *Pseudomonas* spp. y *Bacillus* spp. demuestran la efectividad que han desarrollado por sus mecanismos metabólicos y genéticos para tolerar, biorremediar, acumular y remover cadmio en condiciones *in vitro* resultan como potenciales biorremediadores en suelos contaminados.

Los datos recopilados resultan relevantes para continuar con la construcción de estrategias estandarizadas y escalables para la restauración de suelos contaminados con cadmio mediante un enfoque sustentable.

7. REFERENCIAS

1. Suciu NA, De Vivo R, Rizzati N, Capri E. Cd content in phosphate fertilizer: Which potential risk for the environment and human health? *Curr Opin Environ Sci Health*. diciembre de 2022;30:100392. doi:10.1016/j.coesh.2022.100392
2. Ankush, Ritambhara, Lamba S, Deepika, Prakash R. Cadmium in Environment—An Overview. En: Jha AK, Kumar N, editores. *Cadmium Toxicity in Water* [Internet]. Cham: Springer Nature Switzerland; 2024 [citado 10 de abril de 2025]. p. 3-20. (Springer Water). Disponible en: https://link.springer.com/10.1007/978-3-031-54005-9_1 doi:10.1007/978-3-031-54005-9_1
3. Hou S, Zheng N, Tang L, Ji X, Li Y. Effect of soil pH and organic matter content on heavy metals availability in maize (*Zea mays* L.) rhizospheric soil of non-ferrous metals smelting area. *Environ Monit Assess*. octubre de 2019;191(10):634. doi:10.1007/s10661-019-7793-5
4. Obuekwe IS, Ilechukwu OE. Rhizoremediation of a Cadmium-polluted Soil using *Pseudomonas aeruginosa* and *Eleusine indica*. *J Appl Sci Environ Manag*. 30 de junio de 2023;27(6):1047-56. doi:10.4314/jasem.v27i6.1
5. Aguilar JN. Anteproyecto de código de prácticas para la prevención y reducción de la contaminación por cadmio en los granos de cacao. Países Bajos; 2020.
6. OPERA Research. Cadmium limits in phosphorous fertilizers. noviembre de 2021;29.
7. Nath S, Deb B, Sharma I. Isolation and Characterization of Cadmium and Lead Resistant Bacteria.
8. Zulfiqar U, Haider FU, Maqsood MF, Mohy-Ud-Din W, Shabaan M, Ahmad M, et al. Recent Advances in Microbial-Assisted Remediation of Cadmium-Contaminated Soil. *Plants*. 31 de agosto de 2023;12(17):3147. doi:10.3390/plants12173147
9. Shahid M, Javed MT, Tanwir K, Akram MS, Tazeen SK, Saleem MH, et al. Plant growth-promoting *Bacillus* sp. strain SDA-4 confers Cd tolerance by physio-biochemical improvements, better nutrient acquisition and diminished Cd uptake in *Spinacia oleracea* L. *Physiol Mol Biol Plants*. diciembre de 2020;26(12):2417-33.

doi:10.1007/s12298-020-00900-4

10. Chellaiah ER. Cadmium (heavy metals) bioremediation by *Pseudomonas aeruginosa*: a minireview. *Appl Water Sci.* 2018. doi:s13201-018-0796-5
11. Izrael-Živković L, Rikalović M, Gojgić-Cvijović G, Kazazić S, Vrvic M, Brčeski I, et al. Cadmium specific proteomic responses of a highly resistant *Pseudomonas aeruginosa* strain. *RSC Adv.* 2018;8(19):10549-60. doi:10.1039/C8RA00371H
12. Al-Dhabi NA, Esmail GA, Mohammed Ghilan AK, Valan Arasu M. Optimizing the Management of Cadmium Bioremediation Capacity of Metal-Resistant *Pseudomonas* sp. Strain Al-Dhabi-126 Isolated from the Industrial City of Saudi Arabian Environment. *Int J Environ Res Public Health.* 29 de noviembre de 2019;16(23):4788. doi:10.3390/ijerph16234788
13. Mathivanan K, Chandirika JU, Vinothkanna A, Yin H, Liu X, Meng D. Bacterial adaptive strategies to cope with metal toxicity in the contaminated environment – A review. *Ecotoxicol Environ Saf.* diciembre de 2021;226:112863. doi:10.1016/j.ecoenv.2021.112863
14. Bravo D, Leon-Moreno C, Martínez CA, Varón-Ramírez VM, Araujo-Carrillo GA, Vargas R, et al. The First National Survey of Cadmium in Cacao Farm Soil in Colombia. *Agronomy.* 14 de abril de 2021;11(4):761. doi:10.3390/agronomy11040761
15. Njoku KL, Akinyede OR, Obidi OF. Microbial Remediation of Heavy Metals Contaminated Media by *Bacillus megaterium* and *Rhizopus stolonifer*. *Sci Afr.* noviembre de 2020;10:e00545. doi:10.1016/j.sciaf.2020.e00545
16. Arce-Inga M, González-Pérez AR, Hernandez-Diaz E, Chuquibala-Checan B, Chavez-Jalk A, Llanos-Gomez KJ, et al. Bioremediation Potential of Native *Bacillus* sp. Strains as a Sustainable Strategy for Cadmium Accumulation of *Theobroma cacao* in Amazonas Region. *Microorganisms.* 25 de octubre de 2022;10(11):2108. doi:10.3390/microorganisms10112108
17. Bravo D, Braissant O. Cadmium-tolerant bacteria: current trends and applications in agriculture. *Lett Appl Microbiol.* marzo de 2022;74(3):311-33. doi:10.1111/lam.13594
18. Yu X, Zhao J, Ding Z, Xiong F, Liu X, Tian J, et al. Cadmium-absorptive *Bacillus vietnamensis* 151–6 reduces the grain cadmium accumulation in rice (*Oryza sativa* L.): 151–6

Potential for cadmium bioremediation. *Ecotoxicol Environ Saf.* abril de 2023;254:114760. doi:10.1016/j.ecoenv.2023.114760

19. Tomar DV, Rusho MA, Kumar S, Madasamy M. Genetic Engineering Of Microbes For Enhanced Bioremediation Of Organic Pollutants.
20. Khashei S, Etemadifar Z, Rahmani H. Multifunctional Biofertilizer from *Pseudomonas Putida* PT: A Potential Approach for Simultaneous Improving Maize Growth and Bioremediation of Cadmium-polluted Soils [Internet]. Vol. 8. julio de 2019;8(32). doi:10.22108/bjm.2019.115315.1181
21. Ramírez H, Carriel D. Tratamiento de metales pesados (Hg, Pb y Cd) mediante la aplicación de *Pseudomonas* en lodos residuales auríferos provenientes del Cantón Portovelo. marzo de 2024.
22. Chen Y, Yu Y, Fang X, Zhou Y, Lu D. How *Pseudomonas nitroreducens* Passivates Cadmium to Inhibit Plant Uptake. *Appl Sci.* 28 de marzo de 2024;14(7):2857. doi:10.3390/app14072857
23. Zhang Y, Peng J, Wang Z, Zhou F, Yu J, Chi R, et al. Metagenomic analysis revealed the bioremediation mechanism of lead and cadmium contamination by modified biochar synergized with *Bacillus cereus* PSB-2 in phosphate mining wasteland. *Front Microbiol.* 18 de febrero de 2025;16:1529784. doi:10.3389/fmicb.2025.1529784
24. Rajasekar A, Zhao C, Wu S, Murava RT, Norgbey E, Omoregie AI, et al. Removal of high concentrations of zinc, cadmium, and nickel heavy metals by *Bacillus* and *Comamonas* through microbially induced carbonate precipitation. *Biodegradation.* junio de 2025;36(3):40. doi:10.1007/s10532-025-10131-7
25. Kulkarni K, Jain N, Babu GLS. Sustainable bioremediation and reuse of heavy metal-contaminated dredged sediments using *Bacillus subtilis*. *Biodegradation.* junio de 2025;36(3):32. doi:10.1007/s10532-025-10127-3
26. Liang B, Feng Y, Ji X, Li C, Li Q, Zeng Z, et al. Isolation and characterization of cadmium-resistant *Bacillus cereus* strains from Cd-contaminated mining areas for potential bioremediation applications. *Front Microbiol.* 12 de febrero de 2025;16:1550830. doi:10.3389/fmicb.2025.1550830
27. Fernández-Niño M, Meza JF, Rodríguez-López CM, Buitrago-Acosta MC,

- Cortes-Mera DM, Chica MJ, et al. Systematic Identification of Native *Bacillus* spp. as a Sustainable Approach to Mitigate Cadmium in Cocoa. *Food Front.* enero de 2026;7(1):e70131. doi:10.1002/fft2.70131
28. Olivo GD, Miranda H, Herrera D, Novillo J. Biorremediación de cadmio en suelos cacaoteros mediante consorcios microbianos nativos. *Vol. 11.* 9 de enero de 2026;Vol. 11(1):32-43. doi:10.23857/pc.v11i1.10984
29. Hernández-Caricio C. Los metales pesados en la historia de la humanidad, los efectos de la contaminación por metales pesados y los procesos biotecnológicos para su eliminación: el caso de *Bacillus* como bioherramienta para la recuperación de suelos. 2022.
30. National Center for Biotechnology Information. Cadmium [PubChem]. Cadmium [Internet]. 2004. Disponible en: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Cadmium>
31. Petruzzelli G, Barbafieri M, Franchi E, Fusini D, Vocciante M, Pedron F. Effect of Soil Aging on Cadmium Bioavailability and Bioaccessibility at a Contaminated Site. *Environments.* 20 de junio de 2023;10(6):105. doi:10.3390/environments10060105
32. Dashtey A. Environmental Fate and Transport of Cadmium in Soils and Groundwater: Influence of pH, Redox Conditions, and Organic Matter on Mobility and Bioavailability. *Int J Sci Res Manag IJSRM.* 7 de febrero de 2025;13(02):222-39. doi:10.18535/ijrm/v13i02.c01
33. Zulfiqar U, Jiang W, Xiukang W, Hussain S, Ahmad M, Maqsood MF, et al. Cadmium Phytotoxicity, Tolerance, and Advanced Remediation Approaches in Agricultural Soils; A Comprehensive Review. *Front Plant Sci.* 9 de marzo de 2022;13:773815. doi:10.3389/fpls.2022.773815
34. Kubier A, Wilkin RT, Pichler T. Cadmium in soils and groundwater: A review. *Appl Geochem.* septiembre de 2019;108:104388. doi:10.1016/j.apgeochem.2019.104388
35. Gamboa N. El cadmio, ¿su presencia nos alerta de la contaminación antropogénica? *Vol. 33.* 2019;33.
36. Dutta A, Patra A, Singh Jatav H, Singh Jatav S, Kumar Singh S, Sathyanarayana E, et al. Toxicity of Cadmium in Soil-Plant-Human Continuum and Its Bioremediation Techniques. En: L. Larramendy M, Soloneski S, editores. *Soil Contamination - Threats*

and Sustainable Solutions. IntechOpen; 2021. doi:10.5772/intechopen.94307

37. Jha AK, Kumar N, editores. Cadmium Toxicity in Water: Challenges and Solutions [Internet]. Cham: Springer Nature Switzerland; 2024 [citado 8 de abril de 2026]. (Springer Water). Disponible en: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-031-54005-9> doi:10.1007/978-3-031-54005-9
38. Bricio M. El Cadmio como metal pesado: problemas y efectos en el suelo y las plantas. 2021;24.
39. Zafra CD, Flores JP. Biorremediación de suelo contaminado con cadmio mediante la aplicación de *Rhizopus* sp. y *Rhodobacter sphaeroides* : Revisión. 2020;17.
40. Hou D, Jia X, Wang L, McGrath SP, Zhu YG, Hu Q, et al. Global soil pollution by toxic metals threatens agriculture and human health.
41. Alvarez Morales EL, Guillin Llanos XM, Rodríguez Angulo DE. Análisis de los efectos que produce la presencia de cadmio en el cultivo de cacao (*theobroma cacao*). Ing E Innov. 26 de octubre de 2021;9(2). doi:10.21897/23460466.2723
42. Mubeen S, Ni W, He C, Yang Z. Agricultural Strategies to Reduce Cadmium Accumulation in Crops for Food Safety. Agriculture. 16 de febrero de 2023;13(2):471. doi:10.3390/agriculture13020471
43. Yu Y, Deng L, Zhou L, Chen G, Wang Y. Exogenous Melatonin Activates Antioxidant Systems to Increase the Ability of Rice Seeds to Germinate under High Temperature Conditions. Plants. 25 de marzo de 2022;11(7):886. doi:10.3390/plants11070886
44. Xu Z, Peng J, Zhu Z, Yu P, Wang M, Huang Z, et al. Screening of Leafy Vegetable Varieties with Low Lead and Cadmium Accumulation Based on Foliar Uptake. Life. 24 de febrero de 2022;12(3):339. doi:10.3390/life12030339
45. Fan JL, Ziadi N, Bélanger G, Parent LÉ, Cambouris A, Hu ZY. Cadmium accumulation in potato tubers produced in Quebec. Can J Soil Sci. 1 de agosto de 2009;89(4):435-43. doi:10.4141/cjss08069
46. Zhuang Z, Niño-Savala AG, Mi Z dong, Wan Y nan, Su D chun, Li H fen, et al. Cadmium accumulation in wheat and maize grains from China: Interaction of soil properties, novel enrichment models and soil thresholds. Environ Pollut. abril de

2021;275:116623. doi:10.1016/j.envpol.2021.116623

47. Wulandari AD, Meitiniarti VI. Bioremediation of Pb and Cd contaminated soil using microorganism: A review. D. 2021.
48. Atuchin VV, Asyakina LK, Serazetdinova YR, Frolova AS, Velichkovich NS, Prosekov AY. Microorganisms for Bioremediation of Soils Contaminated with Heavy Metals.
49. Raza A, Habib M, Kakavand SN, Zahid Z, Zahra N, Sharif R, et al. Phytoremediation of Cadmium: Physiological, Biochemical, and Molecular Mechanisms. *Biology*. 21 de julio de 2020;9(7):177. doi:10.3390/biology9070177
50. Kozak K, Antosiewicz DM. Tobacco as an efficient metal accumulator. *BioMetals*. abril de 2023;36(2):351-70. doi:10.1007/s10534-022-00431-3
51. Subašić M, Šamec D, Selović A, Karalija E. Phytoremediation of Cadmium Polluted Soils: Current Status and Approaches for Enhancing. *Soil Syst*. 4 de enero de 2022;6(1):3. doi:10.3390/soilsystems6010003
52. Rigoletto M, Calza P, Gaggero E, Malandrino M, Fabbri D. Bioremediation Methods for the Recovery of Lead-Contaminated Soils: A Review. *Appl Sci*. 20 de mayo de 2020;10(10):3528. doi:10.3390/app10103528
54. Ahmed E, Holmström SJM. Siderophores in environmental research: roles and applications. *Microb Biotechnol*. mayo de 2014;7(3):196-208. doi:10.1111/1751-7915.12117
55. Gadd GM. Metals, minerals and microbes: geomicrobiology and bioremediation. *Microbiology*. 1 de marzo de 2010;156(3):609-43. doi:10.1099/mic.0.037143-0
57. Sharma M, Sharma S, Paavan. Mechanisms of microbial resistance against cadmium – a review. 11 de diciembre de 2023;13-30. doi:https://doi.org/10.1007/s40201-023-00887-6
58. Yi Y, Liu H, Chen G, Wu X, Zeng F. Cadmium Accumulation in Plants: Insights from Phylogenetic Variation into the Evolution and Functions of Membrane Transporters. *Sustainability*. 9 de agosto de 2023;15(16):12158. doi:10.3390/su151612158
59. Zhou Z, Bouma TJ, Fivash GS, Ysebaert T, Van IJzerloo L, Van Dalen J, et al.

Thermal stress affects bioturbators' burrowing behavior: A mesocosm experiment on common cockles (*Cerastoderma edule*). *Sci Total Environ.* junio de 2022;824:153621. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.153621

60. Galan-Freyte NJ, Aranguren-Diaz Y, Ospina-Maldonado SL, Chapuel-Aguillon PF, Pertuz-Peña MF, Hernandez-Rivera SP, et al. Exploring cadmium bioaccumulation and bioremediation mechanisms and related genes in soil microorganisms: a review. *Environ Sci Pollut Res.* 14 de agosto de 2025;32(34):20215-31. doi:10.1007/s11356-025-36802-9
61. Mejía DSC. *Trichoderma* spp., *Pseudomonas* spp., y *Bacillus* spp. como agentes biorremediadores en suelos contaminados con cadmio. *Univ Católica Manizales.* 2024;123.
62. Huang M, Shen S, Meng Z, Si G, Wu X, Feng T, et al. Mechanisms involved in the sequestration and resistance of cadmium for a plant-associated *Pseudomonas* strain. *Ecotoxicol Environ Saf.* noviembre de 2023;266:115527. doi:10.1016/j.ecoenv.2023.115527
63. Stephen P. Diggle, Whiteley M. Microbe Profile: *Pseudomonas aeruginosa* : opportunistic pathogen and lab rat. 2019;4. doi:10.1099/mic.0.000860
64. Sánchez Carrillo R, Guerra Ramírez P. *Pseudomonas* spp. benéficas en la agricultura. *Rev Mex Cienc Agríc.* 21 de junio de 2022;13(4):715-25. doi:10.29312/remexca.v13i4.2799
65. Zhong C, Zhou Y, Fu J, Qi X, Wang Z, Li J, et al. Cadmium stress efficiently enhanced meropenem degradation by the meropenem- and cadmium-resistant strain *Pseudomonas putida* R51. *J Hazard Mater.* mayo de 2022;429:128354. doi:10.1016/j.jhazmat.2022.128354
66. Prabhakaran R, Thamarai R. Elucidation of the CadA Protein 3D Structure and Affinity for Metals. *Bioinforma Biol Insights.* enero de 2024;18:13. doi:10.1177/11779322241266701
67. González SM, Alemán M, Navarro D. *Bacillus*: una bacteria versátil multifuncional y ampliamente aplicada. 9.
68. González Y, Ortega J, Anducho M, Mercado Y. *Bacillus subtilis* y *Trichoderma*:

Características generales y su aplicación en la agricultura. Rev Espec En Ciencias Quím-Biológicas. 2022;1-14. doi:<https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.520>

69. Long J, Yu M, Xu H, Huang S, Wang Z, Zhang XX. Characterization of cadmium biosorption by inactive biomass of two cadmium-tolerant endophytic bacteria *Microbacterium* sp. D2-2 and *Bacillus* sp. C9-3. *Ecotoxicology*. septiembre de 2021;30(7):1419-28. doi:10.1007/s10646-021-02363-z
70. Roşca M, Diaconu M, Hlihor RM, Cozma P, Silva B, Tavares T, et al. Evaluation of Microbial Biosorbents for Efficient Cd (II) Removal from Aqueous Solutions. *Water*. 19 de diciembre de 2024;16(24):3660. doi:10.3390/w16243660
71. Li Q, Zhang W, Liao S, Xing D, Xiao Y, Zhou D, et al. Mechanism of lead adsorption by a *Bacillus cereus* strain with indole-3-acetic acid secretion and inorganic phosphorus dissolution functions. *BMC Microbiol*. 4 de marzo de 2023;23(1):57. doi:10.1186/s12866-023-02795-z
72. Wróbel M, Śliwakowski W, Kowalczyk P, Kramkowski K, Dobrzyński J. Bioremediation of Heavy Metals by the Genus *Bacillus*. *Int J Environ Res Public Health*. 11 de marzo de 2023;20(6):4964. doi:10.3390/ijerph20064964
73. Guo J. Long-Term Heavy Metal Pollution Induces Complex Differences in Farmland Topsoil and Rhizosphere Microbial Communities. 6 de diciembre de 2023;1-15. doi:<https://doi.org/10.3390/su152416598>
74. Othman AR. Biosorption of hexavalent chromium in aqueous solution by *Bacillus cereus*. 2025;11. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104015>
76. Mshelia MS, Jones AN, Yadima SG. Bioremediation of Soil Polluted with Cadmium and Zinc Using Microflora from Abattoir Effluent. Vol. 29. diciembre de 2022;29(3).